

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ DE ALMENDRA FREITAS JUNIOR

**MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO COM MADEIRA PARA MITIGAÇÃO DE
GASES DE EFEITO ESTUFA NA EXECUÇÃO DE EDIFICAÇÕES**

**CURITIBA
2017**

JOSÉ DE ALMENDRA FREITAS JUNIOR

**MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO COM MADEIRA PARA MITIGAÇÃO DE
GASES DE EFEITO ESTUFA NA EXECUÇÃO DE EDIFICAÇÕES**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências
Agrárias da Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial para a obtenção do título
de “Doutor em Engenharia Florestal”.

Orientador:

Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Co-orientadores:

Dr. Setsuo Iwakiri

Dr. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

**CURITIBA
2017**

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira UFPR

Freitas Junior Jose de Almendra

Materiais de construção com madeira para mitigação de gases de efeito estufa
na execução de edificações / Jose de Almendra Freitas Junior – Curitiba 2017
203 f il

Orientador Prof Dr Carlos Roberto Sanquetta

Coorientadores Prof Dr Setsuo Iwakiri

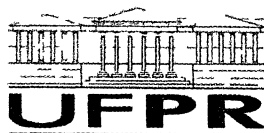
Prof^a Dr^a Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa

Tese (Doutorado) Universidade Federal do Paraná Setor de Ciências
Agrárias Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal Defesa Curitiba
20/06/2017

Área de concentração Manejo Florestal

1 Estruturas de madeira (Construção civil) 2 Carbono 3 Efeito estufa
(Atmosfera) 4 Madeira Produtos 5 Teses I Sanquetta Carlos Roberto II Iwakiri
Setsuo III Costa Marienne do Rocio de Mello Maron da IV Universidade Federal do
Paraná Setor de Ciências Agrárias V Título

CDD – 634.9
CDU – 634.0.833




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós Graduação ENGENHARIA FLORESTAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JOSÉ DE ALMENDRA FREITAS JUNIOR** intitulada **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO COM MADEIRA PARA MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA EXECUÇÃO DE EDIFICAÇÕES** após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APPROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós Graduação.

Curitiba, 20 de Junho de 2017



CARLOS ROBERTO SANQUETTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



JOSÉ MARQUES FILHO

Avaliador Externo (UFPR)



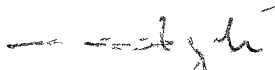
ANA PAULA DALLA CORTE

Avaliador Interno (UFPR)



MARJENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA

Avaliador Externo (UFPR)



ANDRÉ NAGALLI

Avaliador Externo (UFPR)

DEDICATÓRIA

À minha esposa Cinthia, aos meus filhos Jessica e José e aos meus pais, pessoas que sempre me ajudaram e me incentivaram ao estudo.

AGRADECIMENTOS

Como todo o trabalho desta Tese é fruto de todas as companhias e o apoio que recebi durante os anos de duração do Doutorado, inicio os agradecimentos pelo meu orientador Prof. Carlos Roberto Sanquetta, que sempre deu todo o apoio necessário, desde a seleção de ingresso, até a finalização do trabalho, igualmente aos agradeço aos professores co-orientadores Setsuo Iwakiri e Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa, pela colaboração no desenvolvimento desta tese e por todas as sugestões. Agradeço de igual forma a todos os professores da pós-graduação da Engenharia Florestal pela ajuda e paciência de trabalhar com um aluno engenheiro civil. Agradeço também ao colega professor Carlos Parchen por ter e motivado a ingressar no Doutorado e ter sugerido bons caminhos a seguir, agradeço a colega professora Barbara Villas Bôas pela colaboração nos estudos estatísticos e as informações sobre os blocos de concreto com partículas de madeira, as colegas professoras Laila Valduga Artigas e Marienne R. M. M. da Costa pela ajuda com os estudos sobre argamassas, aos amigos eng. Moacir e Fabio Inoue pela ajuda com as análises de estruturas de concreto armado, a colega professora Rosilani Trianoski, aos laboratoristas do BIOFIX, Tauane Garcia Barreto e Verusa Mendonça, ao professor Renato Marques e ao laboratorista Hilbert (Agrárias-UFPR) pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios de medição de carbono e a então estagiaria Letícia de Moraes. De igual forma gostaria de agradecer a todos os professores do Departamento de Construção Civil da UFPR, por permitirem o meu afastamento para o desenvolvimento desse doutorado, em especial aos chefes prof. José Marques Filho e Marienne R. M. M. da Costa (novamente). Agradeço aos meus pais, pela vida e bons exemplos recebidos. A minha família, minha esposa Cinthia e meus filhos Jéssica e José, pelo amor, carinho e compreensão.

Para todos, muito obrigado.

RESUMO GERAL

A evolução dos acordos internacionais para combater o aquecimento global direcionam as nações para que estas produzam relatórios de emissões de gases do efeito estufa (GEE) com a finalidade de estabelecer controles e metas. Para os setores da indústria florestal e da construção civil do Brasil, país que é grande produtor de madeira, torna-se relevante considerar o carbono armazenado nos materiais de construção de madeira duráveis de origem manejada e que são utilizados nos edifícios residenciais. Esta Tese mostra a viabilidade do uso desses materiais com o objetivo de se mitigar emissões de GEE possibilitando nos aproximarmos da meta de se construir obras neutras em emissões de carbono. Este documento contém as principais regulamentações do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e Normas técnicas internacionais que regem o assunto e permitem a contabilização desse carbono armazenado. Dentro desta pesquisa estudaram-se os materiais de madeira usuais no Brasil (portas, pisos, forros e complementos), mostrando que o carbono armazenado nestes materiais é da ordem de 17,4 kg de carbono por m² da área de apartamentos ou cerca de 9% das suas emissões de construção. Além dos materiais usuais são apresentadas algumas soluções “não usuais” de aplicações de madeira que representam, em média, mais 49 kg de carbono por m² ou 24% das suas emissões de construção. Este conjunto de materiais de madeira pode mitigar até cerca de 30% das emissões de construção. Além dos materiais de madeira, o trabalho também desenvolve uma análise das “coberturas verdes” como forma de armazenar carbono, mostrando que essas podem conter carbono suficiente para mitigar mais de 10% das emissões de construção de um edifício de 12 pavimentos. Outra informação apresentada é a representatividade do carbono absorvido pelas argamassas de cal e cimento, utilizadas como revestimento, mostrando que a não consideração desse carbono pode ocasionar erros da ordem de 2% na contabilidade das emissões de construção de edifícios.

Palavras chave:

Materiais de construção de madeira, efeito estufa, emissões de CO₂.

GENERAL ABSTRACT

The evolution of international agreements to combat global warming, drives the nations to produce greenhouse gas (GHG) emissions reports for the purpose of establishing controls and targets. For the forest and construction industry sectors in Brazil, a country that is a major producer of wood, it is relevant to consider the carbon stored in durable wood construction materials of managed forests and used in residential buildings. This thesis shows the feasibility of using these materials with the aim of mitigating GHG emissions, allowing us to approach the goal of building works that are neutral in carbon emissions. This document contains the main IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) regulations and international technical standards that govern the subject and allow for the accounting of this stored carbon. In this study, the wood materials common used in Brazil (doors, floors, linings and complements) were studied, showing that the carbon stored in these materials is of the order of 17,4 kg of carbon per m² of the apartment area or about 9% of the their construction emissions. In addition to the usual materials are presented some "unusual" solutions of wood applications, which represents on average more 49 kg of carbon per m² or 24% of their construction emissions. This set of wood materials can mitigate up to about 30% of construction emissions. In addition to the wood materials, this document also develops an analysis of "green roofing" as a way to store carbon, showing may contain enough carbon to mitigate more than 10% of building emissions from a 12-story building. Another information presented is the representativeness of the carbon absorbed by lime and cement mortars, showing that the non-consideration of this carbon can cause errors of the order of 2% in the accounting of building construction emissions.

Key words: Wood building materials, greenhouse effect, CO₂ emissions.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	CONCENTRAÇÕES DE CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O A PARTIR DO ANO UM	26
FIGURA 2 -	TEMPERATURAS MÉDIAS DO PLANETA DESDE 1880.	27
FIGURA 3 -	EMISSIONES GLOBAIS DE CO ₂	29
FIGURA 4 -	ESQUEMA DA CADEIA DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO ₂	30
FIGURA 5 -	PRINCIPAIS FASES DA CADEIA DOS HWP E O DESTINO DO CARBONO.....	33
FIGURA 6 -	FLUXOS DE CARBONO NA FABRICAÇÃO DE PRODUTOS “NÃO-DE-MADEIRA” (EMISSIONES LÍQUIDAS = D).....	45
FIGURA 7 -	FLUXOS DE CARBONO NA FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE MADEIRA. [EMISSIONES LÍQUIDAS = (A B) + B – C B = A – B – C]	45
FIGURA 8 -	PAINEL OSB.....	53
FIGURA 9 -	IMAGEM DE UM PAINEL MDP COM AS DIFERENÇAS ENTRE AS CAMADAS.....	56
FIGURA 10 -	ESQUEMA DOS PISOS LAMINADOS MELAMÍNICOS	58
FIGURA 11 -	ESQUEMA DAS PAREDES DIVISÓRIAS TIPO <i>WOOD FRAME</i>	84
FIGURA 12 -	BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	85
FIGURA 13 -	AS CAMADAS DO SISTEMA DE “COBERTURA VERDE”	88
FIGURA 14 -	EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM CURITIBA OBJETO DE TRABALHO CIENTÍFICO SOBRE EMISSIONES	99
FIGURA 15 -	EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM ZARAGOZA (ESPANHA), ESTUDO DE CASO 1, PARCELA 12, OBJETO DE ACV..	100
FIGURA 16 -	EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM ZARAGOZA, (ESPANHA) ESTUDO DE CASO 2, PARCELA 12, OBJETO DE ACV..	100
FIGURA 17 -	EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM FRANKFURT (ALEMANHA), OBJETO DE ACV.....	100
FIGURA 18 -	FLUXO GERAL DA PESQUISA.....	103
FIGURA 19 -	OS TIJOLOS CERÂMICOS REVESTIDOS COM ARGAMASSA.....	120
FIGURA 20 -	EXTRAÇÃO DE AMOSTRA DA CAMADA “B” E OS POTES DE ACONDICIONAMENTO ATÉ O MOMENTO DA ANÁLISE.....	121

FIGURA A1 - PLANTA DO APARTAMENTO "A" DE 476,3 m ² PRIVATIVOS.....	179
FIGURA A2 - PLANTA DO APARTAMENTO "B" DE 222,7 m ² PRIVATIVOS.....	180
FIGURA A3 - PLANTA DO APARTAMENTO "C" DE 118,1 m ² PRIVATIVOS	181
FIGURA A4 - PLANTA DO APARTAMENTO "D" DE 89,0 m ² PRIVATIVOS.....	182
FIGURA A5 - PLANTA DO APARTAMENTO "E" DE 61,5 m ² PRIVATIVOS.....	183

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA MADERA SERRADA DOS EUA	49
TABELA 2 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA MADERA SERRADA DA ALEMANHA E DA FINLÂNDIA.....	50
TABELA 3 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA PAINÉIS COMPENSADOS.....	51
TABELA 4 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA PAINÉIS DE OSB.....	53
TABELA 5 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA PAINÉIS DE MDF.....	54
TABELA 6 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO POR PAINÉIS DE MDP.....	56
TABELA 7 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA PISOS LAMINADOS.....	59
TABELA 8 -	EMISSIONES E ALMACENAMIENTO PARA PISOS DE MADERA MACIÇA.....	60
TABELA 9 -	COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL.....	62
TABELA 10-	EMISSIONES POR TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND.....	63
TABELA 11-	EMISSIONES DE PRODUTOS SIDERÚRGICOS.....	65
TABELA 12-	EMISSIONES DE PRODUTOS SIDERURGICOS DA <i>WORLD WIDE LCI DATABASE FOR STEEL INDUSTRY PRODUCT DE 1999</i>	66
TABELA 13-	EMISSIONES PARA A CAL.....	68
TABELA 14-	EMISSIONES PARA A CAL POR ETAPAS.....	68
TABELA 15-	EMISSIONES PARA CERÂMICAS VERMELHAS.....	70
TABELA 16-	EMISSIONES PARA AGREGADO GRAÚDO.....	72
TABELA 17-	EMISSIONES PARA AGREGADO MIÚDO.....	73
TABELA 18-	DOSAGENS DOS CONCRETOS ACV Athena (2005).....	74
TABELA 19-	EMISSIONES DOS CONCRETOS Athena (2005).....	75
TABELA 20-	CONCRETOS COM CP II-E 32 – Costa (2012).....	75
TABELA 21-	CONCRETOS COM CP II-F 32 – Costa (2012).....	76
TABELA 22-	DOSAGENS PARA CONCRETOS DE Sjunnesson (2005).....	76

TABELA 23-	DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE DE Sjunnesson (2005).....	76
TABELA 24-	EMISSÕES PARA CONCRETOS Sjunnesson (2005).....	77
TABELA 25-	EMISSÕES PARA CONCRETOS – Hsu (2010).....	78
TABELA 26-	EMISSÕES PELOS PAINÉIS DE GESSO ACARTONADO.....	81
TABELA 27-	REPRESENTATIVIDADE DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES.....	98
TABELA 28-	SALDO DO CARBONO ARMAZENADO NAS CV E ACRÉSCIMOS DE EMISSÕES.....	118
TABELA 29-	O CARBONO ARMAZENADO NAS FOLHAS DE PORTAS.....	124
TABELA 30-	O CARBONO ARMAZENADO NOS BATENTES E ALIZARES.....	125
TABELA 31-	O CARBONO ARMAZENADO NOS PISOS, RODAPÉS E FORROS.....	126
TABELA 32-	O CARBONO NOS MATERIAIS PARA PAREDES DIVISÓRIAS SOLOS ORGÂNICOS.....	126
TABELA 33-	CARBONO ARMAZENADO NOS CENÁRIOS PARA OS CONJUNTOS DE PORTAS COMPLETOS.....	128
TABELA 34-	CARBONO ARMAZENADO NOS CENÁRIOS PARA OS PISOS E RODAPÉS.....	128
TABELA 35-	OS APARTAMENTOS E QUANTIDADES DOS MATERIAIS “USUAIS”.....	129
TABELA 36-	OS APARTAMENTOS E ÁREAS DE APLICAÇÕES DOS MATERIAIS “NÃO USUAIS” E DE ARGAMASSAS.....	129
TABELA 37-	MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “A”.....	130
TABELA 38-	MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “B”.....	130
TABELA 39-	MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “C”.....	131
TABELA 40-	MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “D”.....	131
TABELA 41-	MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “E”.....	131
TABELA 42-	EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NO MDP NOS PISOS.....	132
TABELA 43-	QUANTIDADES DOS MATERIAIS NAS PAREDES DIVISÓRIAS <i>WOOD FRAME</i>	133

TABELA 44-	EMISSIONS DAS PAREDES DIVISÓRIAS <i>WOOD FRAME</i>	133
TABELA 45-	CARBONO ARMAZENADO NAS PAREDES DIVISÓRIAS <i>WOOD FRAME</i>	134
TABELA 46-	MATÉRIAS-PRIMAS E EMISSIONS POR BLOCO COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	134
TABELA 47-	ARMAZENAMENTO E CAPTURA DE CO ₂ PARA OS BLOCOS	135
TABELA 48-	EMISSIONS LÍQUIDAS DOS BLOCOS.....	135
TABELA 49-	EMISSIONS E ARMAZENAMENTO PELAS PAREDES DIVISÓRIAS DE BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	135
TABELA 50-	EMISSIONS DE CONSTRUÇÃO CORRIGIDAS DEVIDO AO USO DE <i>WOOD FRAME</i>	136
TABELA 51-	EMISSIONS DE CONSTRUÇÃO CORRIGIDAS COM O USO DE BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	137
TABELA 52-	A MITIGAÇÃO PELOS MATERIAIS “USUAIS” DE MADEIRA.....	138
TABELA 53-	EMISSIONS E O CARBONO ARMAZENADO NO MDP NOS PISOS.....	138
TABELA 54-	AS MITIGAÇÕES DE EMISSIONS DEVIDO AO <i>WOOD FRAME</i>	139
TABELA 55-	MITIGAÇÕES PELO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	140
TABELA 56-	ÁREAS TOTAIS, DE CV E EMISSIONS DOS EDIFÍCIOS.....	141
TABELA 57-	CARBONO ARMAZENADO NAS CV E MITIGAÇÕES.....	142
TABELA 58-	CONSUMOS DOS AGLOMERANTES PELAS ARGAMASSAS.....	142
TABELA 59-	AS EMISSIONS PARA AS ARGAMASSAS.....	143
TABELA 60-	POTENCIAIS DE ABSORÇÃO DE CO ₂ PELAS ARGAMASSAS	144
TABELA 61-	POTENCIAIS DE ABSORÇÃO DE C e CO ₂ POR kg E m ³	144
TABELA 62-	RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS.....	145
TABELA 63-	O CARBONO ABSORVIDO NAS DIFERENTES IDADES	146
TABELA 64-	FRAÇÕES DOS POTENCIAIS DE ABSORÇÃO ATINGIDOS AOS 730 DIAS (DOIS ANOS).....	147
TABELA 65-	EMISSIONS E ABSORÇÕES PELAS ARGAMASSAS.....	147

TABELA 66-	EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO CORRIGIDAS E ERROS...	148
TABELA 67-	AS RELAÇÕES DE CARBONATAÇÃO E OS AGLOMERANTES.....	149
TABELA 68-	COMPARATIVO DAS MITIGAÇÕES.....	152
TABELA 69-	MITIGAÇÕES TOTAIS ALCANÇADAS	153

TABELA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CFC	Cloro Flúor Carboneto
GEE	Gases do Efeito de Estufa
CERFLOR	Certificado Florestal
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono equivalente
COP	Conference of Parties
CV	Cobertura Verde
DAP	<i>Declaração Ambiental de Produto</i>
DPL	<i>Direct Pressure Laminate floor coverings</i>
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of United Nations</i>
FE	Fator de Emissões
FF	Resina Fenol-Formaldeído
FSC	<i>Forest Stewardship Council</i>
GHG <i>Protocol</i>	<i>GreenHouse Gas protocol</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HDF	<i>High Density Fiberboard</i>
HWP	<i>Harvested Wood Products</i>
HFC	Hidro Flúor Carboneto
HPL	<i>High Pressure Laminate floor covering</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IV	InfraVermelho
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
NMVOC	<i>Non-Methane Volatile Organic Compounds</i>
MME	Ministério das Minas e Energia
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDI	resina Metileno Difenil dilsocianato
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MUF	mistura de resinas Melamina-Ureia-Formaldeído
N ₂ O	Óxido Nitroso
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PFC	Per Fluor Carboneto
SBSTA	<i>Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice</i>

TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UF	resina Uréia-Formaldeído
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UV	UltraVioleta

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
1.1.	O PROBLEMA E A HIPÓTESE DE PESQUISA.....	22
1.2..	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1.	O EFEITO ESTUFA.....	24
2.2.	O SETOR DA CONSTRUÇÃO E OS GEE	27
2.3.	OS CONCEITOS DE SEQÜESTRO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO.....	29
2.4.	O IPCC E O CARBONO NOS HARVESTED WOOD PRODUCTS (HWP).....	33
2.5.	SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO PARA GESTÃO FLORESTAL	35
2.6.	O CARBONO FIXADO NA MADEIRA.....	36
2.7.	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS E DOS EDIFÍCIOS.....	37
2.8.	AS REDUÇÕES DE EMISSÕES DEVIDO AO USO DOS HWP.....	42
2.9.	OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO À BASE DE MADEIRA.....	46
2.9.1.	PRODUTOS DE MADEIRA SERRADA	48
2.9.2.	PAINÉIS COMPENSADOS.....	50
2.9.3.	PAINÉIS OSB (<i>ORIENTED STRAND BOARD</i>).....	52
2.9.4.	PAINÉIS MDF (<i>MEDIUM DENSITY FIBERBOARD</i>).....	53
2.9.5.	PAINÉIS MDP (<i>MEDIUM DENSITY PARTICLE FIBERBOARD</i>).....	55
2.9.6.	PISOS LAMINADOS MELAMÍNICOS EM HDF.....	56
2.9.7.	PISOS DE MADEIRA MACIÇA.....	60
2.10.	OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO “NÃO DE MADEIRA”	60
2.10.1.	O CIMENTO PORTLAND.....	61
2.10.2.	O AÇO.....	63
2.10.3.	A CAL.....	66
2.10.4.	OS MATERIAIS CERÂMICOS.....	69
2.10.5.	OS AGREGADOS.....	70
2.10.5.1.	AGREGADOS GRAÚDOS.....	71
2.10.5.2.	AGREGADOS MIÚDOS	72
2.11.	O CONCRETO.....	73

2.12.	AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....	78
2.13.	OS PAINÉIS DE GESSO ACARTONADO.....	80
2.14.	O TRANSPORTE.....	82
2.15.	ALGUNS SISTEMAS CONSTRUTIVOS QUE ARMAZENAM CARBONO.....	82
2.15.1.	PAREDES DIVISÓRIAS DE MADEIRA TIPO <i>WOOD FRAME</i>	83
2.15.2.	BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	84
2.15.3.	JARDINS ELEVADOS OU “COBERTURAS VERDES”.....	86
2.16.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS DE MADEIRA.....	89
2.17.	FORMAS DE LEVANTAMENTO DAS EMISSÕES DA CONSTRUÇÃO.....	92
2.18.	AS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PARA EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS.....	97
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	101
3.1.	A DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PARA EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS.....	104
3.2.	A DETERMINAÇÃO DAS MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	104
3.3.	MONTAGEM DO CONJUNTO DE APARTAMENTOS REPRESENTATIVOS E AS QUANTIDADES DOS MATERIAIS QUE ARMAZENAM CARBONO	107
3.3.1.	MONTAGEM DOS CENÁRIOS DE QUALIDADES DE ACABAMENTOS DOS MATERIAIS “USUAIS”.....	108
3.4.	DETERMINAÇÃO DO CARBONO PRESENTE NOS PRODUTOS “USUAIS” DE MADEIRA.....	108
3.4.1.	A MITIGAÇÃO PELOS MATERIAIS “USUAIS”.....	109
3.5.	O CARBONO NAS APLICAÇÕES DE MADEIRA “NÃO USUAIS”	109
3.5.1.	O CARBONO NO ISOLAMENTO ACÚSTICO COM OS PAINÉIS MDP.....	110
3.5.1.1.	A MITIGAÇÃO PELOS PAINÉIS MDP.....	110
3.5.1.2.	IMPACTOS DOS CUSTOS DO USO DO MDP SOB OS PISOS.....	110
3.5.2.	O CARBONO NAS DIVISÓRIAS DE MADEIRA TIPO <i>WOOD FRAME</i>	111
3.5.2.1.	CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO COM A RETIRADA DAS ALVENARIAS CONVENCIONAIS E INCLUSÃO DO <i>WOOD FRAME</i>	112

3.5.2.2.	A MITIGAÇÃO PELAS PAREDES DIVISÓRIAS <i>WOOD FRAME</i>	113
3.5.2.3.	IMPACTOS DOS CUSTOS DO USO DO <i>WOOD FRAME</i>	113
3.5.3.	O CARBONO NAS PAREDES DE VEDAÇÃO COM BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	113
3.5.3.1.	AS EMISSÕES DE PRODUÇÃO DOS BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	113
3.5.3.2.	O CARBONO ARMAZENADO NO BLOCO CIMENTÍCIO COM PARTÍCULAS DE MADEIRA	115
3.5.3.3.	CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PELO USO DE BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	116
3.5.3.4.	AS MITIGAÇÕES PELOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	116
3.5.3.5.	IMPACTOS DOS CUSTOS DO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	116
3.6.	O ARMAZENAMENTO DE CARBONO NAS “COBERTURAS VERDES”.....	117
3.7.	EMISSÕES E ABSORÇÕES DE CO ₂ PELAS ARGAMASSAS DE CAL.....	118
3.7.1.	AS EMISSÕES DE CO ₂ PELAS ARGAMASSAS DE CAL.....	118
3.7.2.	AS ABSORÇÕES DE CO ₂ PELAS ARGAMASSAS DE CAL.....	119
3.7.3.	O PROGRAMA EXPERIMENTAL COM AS ARGAMASSAS DE CAL.....	120
3.7.4.	OS ERROS AO SE CONSIDERAR AS EMISSÕES LÍQUIDAS DAS ARGAMASSAS.....	122
4.	RESULTADOS	123
4.1.	AS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PARA EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS.....	123
4.2.	AS MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO..	124
4.2.1.	O CARBONO ARMAZENADO E OS CENÁRIOS DE QUALIDADES DE ACABAMENTOS DOS MATERIAIS “USUAIS”.....	127
4.3.	OS MATERIAIS QUE ARMAZENAM CARBONO NOS APARTAMENTOS REPRESENTATIVOS.....	128
4.4.	O CARBONO PRESENTE NOS PRODUTOS “USUAIS” DE MADEIRA.....	129
4.5.	AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NOS PRODUTOS “NÃO USUAIS”	132

4.5.1.	AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NO MDP SOB OS PISOS.....	132
4.5.2.	AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO DEVIDO AO USO DAS PAREDES DIVISÓRIAS <i>WOOD FRAME</i>	132
4.5.3.	AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO DEVIDO AO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	134
4.6.	AS CORREÇÕES DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO DEVIDO AO USO DOS MATERIAIS “NÃO USUAIS” NAS PAREDES INTERNAS.....	136
4.6.1.	CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO COM A RETIRADA DAS ALVENARIAS CONVENCIONAIS E INCLUSÃO DAS <i>WOOD FRAME</i>	136
4.6.2.	CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO COM A RETIRADA DAS ALVENARIAS CONVENCIONAIS E INCLUSÃO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	137
4.7.	AS MITIGAÇÕES DE EMISSÕES PELOS MATERIAIS APLICADOS INTERNAMENTE NOS APARTAMENTOS.....	137
4.7.1.	A MITIGAÇÃO PELOS MATERIAIS “USUAIS”	137
4.7.2.	A MITIGAÇÃO PELOS MDP NOS PISOS.....	138
4.7.2.1.	O IMPACTO DOS CUSTOS PELO USO DO MDP SOB OS PISOS...	139
4.7.3.	A MITIGAÇÃO PELOS <i>WOOD FRAME</i> NAS PAREDES INTERNAS.....	139
4.7.3.1.	O IMPACTO DOS CUSTOS PELO USO DO <i>WOOD FRAME</i>	139
4.7.4.	A MITIGAÇÃO PELAS PAREDES INTERNAS COM BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA	140
4.7.4.1.	O IMPACTO DOS CUSTOS PELO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	141
4.8.	AS MITIGAÇÕES PELA INSTALAÇÃO DAS COBERTURAS VERDES	141
4.9.	O CARBONO ABSORVIDO PELAS ARGAMASSAS DE CAL E CIMENTO	142
4.9.1.	EMISSÕES DE PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	143
4.9.2.	OS POTENCIAIS DE ABSORÇÃO DE CO ₂	143
4.9.3.	O PROGRAMA EXPERIMENTAL COM AS ARGAMASSAS DE CAL.....	145
4.9.4.	OS ERROS AO SE CONSIDERAR AS EMISSÕES LÍQUIDAS DAS ARGAMASSAS.....	147

4.9.5.	INFLUÊNCIA DA CAL E DO CIMENTO SOBRE AS ABSORÇÕES ...	148
5.	DISCUSSÕES	150
6.	CONCLUSÕES	156
7.	RECOMENDAÇÕES	158
	REFERÊNCIAS.....	159
	APÊNDICE 1 – PLANTAS DOS APARTAMENTOS SELECIONADOS	179
	ANEXO 1 – Artigo:	184

1. INTRODUÇÃO

Devido aos crescentes desafios ambientais que a sociedade contemporânea vem enfrentando, o problema do efeito estufa e o aumento das concentrações do CO₂ na atmosfera estão se tornando cada vez mais relevantes e preocupantes para todos. Dentro desse contexto, muitos países desenvolvidos ou até cidades de forma individual têm demonstrado preocupações quanto às emissões dos gases do efeito estufa (GEE), devido à produção ou construção das edificações. Os Estados Unidos, países da Europa, Austrália, Canadá, entre outros, vêm desenvolvendo e implementando regulamentos especificamente destinados a controlar as emissões de carbono pelos edifícios, tanto durante a sua fase de uso como na sua fase de construção. Um dos desafios atuais para a indústria da construção civil dessas nações é alcançar o objetivo de produzir edifícios “neutros em carbono” a partir de 2030, o que significa alcançar o equilíbrio entre as quantidades de carbono emitidas e armazenadas ou armazenadas. O Brasil, embora ainda não tenha atingido este nível de ações, já têm construtoras e incorporadoras que voluntariamente vêm publicando relatórios de emissões de GEE e buscando caminhos para minimizá-las.

Em 2008, sob o patrocínio do Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia (*EU JRC - Joint Research Centre*), a publicação de Nemry *et al.*(2008), apresentou recomendações para novas construções, onde foi colocado que melhorias ambientais significativas na indústria da construção só podem ser alcançadas com a substituição de produtos "convencionais" (concreto, aço, tijolos cerâmicos entre outros), por produtos de madeira. Como o Brasil é um grande produtor de madeira, o uso desses torna-se ainda mais interessante pelo fato da madeira ser um “estoque” de carbono de origem não fóssil.

Como o uso de produtos de madeira nos edifícios já é usual, este trabalho mostra que é relevante a consideração do carbono armazenado nos relatórios de emissões publicados no Brasil. Esta ação que já é aplicada nos países desenvolvidos permite a mitigação de parte das emissões de GEE consequentes da construção das obras. As normas internacionais ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 possibilitam esta consideração.

Atualmente no Brasil já existem diversas empresas do ramo da construção que vem tomando iniciativas no sentido de estabelecer processos de gestão de suas emissões de GEE. A maneira atualmente utilizada é confeccionar Inventários de Emissões de GEE para se controlar as emissões e identificar pontos para otimizações. Recentemente com a publicação da nova norma de declaração ambiental de produtos (DAP), a NBR ISO 14025:2015, já começam a ficar disponíveis Declarações Ambientais de Produtos, retiradas de estudos de análise de ciclo de vida (ACV), que facilitam a confecção e aumentam a precisão desses inventários. Nas ACV e nos DAP é mostrado o carbono armazenado nos produtos de madeira. O IPCC, em 2006, (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) da ONU permite a contabilização de carbono armazenado em produtos de madeira, mas não é permitida a contabilização de carbono de origem fóssil, conforme recomenda a ISO 14044:2006.

Os produtos de madeira, durante sua vida útil, funcionam como reservatório de carbono que, complementa a atividade florestal, em especial das florestas plantadas, mantendo o carbono armazenado depois da colheita da floresta. Durante a vida útil do produto de madeira, a atividade florestal está manejando novas florestas, que durante a sua fase de crescimento capturam novo carbono do ar. Dessa forma, o armazenamento do carbono não se limita ao local e período de vida da floresta, permanece nos produtos aplicados durante toda a sua vida útil. Mesmo ao final da vida útil do produto, se o produto for destinado para aterros sanitários o carbono permanece fixado por muitos mais anos ainda, com taxa de decaimento muito pequena. Dentro desse contexto pode-se considerar que produtos de madeira atuam armazenando carbono e permitindo a mitigação das emissões de CO₂ pela construção.

1.1. O PROBLEMA E A HIPÓTESE DE PESQUISA

O problema tratado nesta Tese está relacionado com a melhoria do desempenho do setor da construção civil quanto às emissões de GEE pelas obras de construção de edifícios, por meio da mitigação de emissões pelo armazenamento de carbono em materiais de construção de madeira com origem certificada.

A hipótese que é inicialmente levantada, após a análise de diversos relatórios de emissões de GEE de empresas de construção, assim como do manual do SINDUSCON-SP (2013) recomendado para sua confecção, é de que: “O carbono presente nos materiais de construção de madeira certificada nas obras de construção de edifícios pode e deve ser considerado como forma de mitigar parte das emissões de CO₂ pela construção”. A hipótese complementar considera que, com pequenos acréscimos de custos, é tecnicamente possível se mitigar boa parte das emissões de GEE, atendendo às normas técnicas nacionais e internacionais que regem as formas de levantamento de emissões pelas obras de construção.

1.2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a utilização da madeira e derivados, em aplicações duráveis como materiais de construção em edifícios residenciais, como forma de armazenamento de carbono.

Como objetivos específicos desta pesquisa citam-se:

- Avaliar as aplicações já usuais de produtos de madeira em edifícios residenciais, como portas, pisos e forros, como forma de armazenamento de carbono;
- Avaliar alternativas construtivas com o uso de madeira que não causem acréscimos de custos importantes ou não causem prejuízos significativos de desempenho técnico das edificações, também como forma de armazenamento de carbono em apartamentos;
- Verificar a eficiência de “coberturas verdes” como forma de armazenamento de carbono, avaliando se o carbono armazenado é

superior ao emitido pelo aumento de uma estrutura de concreto armado que é necessário para suportar essas coberturas;

- Fornecer subsídios e mostrar a importância de se relatar corretamente as emissões e absorções de CO₂ pelas argamassas que contêm cal nos relatórios de emissões da construção civil;
- Fornecer à indústria florestal de madeira certificada e à indústria madeireira informações e argumentos favoráveis ao uso de seus produtos na construção civil;
- Apontar caminhos para a indústria da construção civil para que com acréscimos mínimos de custos e sem perdas de qualidade, se aproxime ou até se alcance a meta de se construir “neutro em carbono”.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir está apresentada uma revisão bibliográfica que trata sobre os assuntos relacionados a este trabalho, iniciando pelo efeito estufa e o setor da construção civil, como os materiais de construção de madeira certificada podem colaborar para a mitigação das emissões.

Na sequência são abordados os materiais de construção de madeira e “não de madeira”, e os efeitos das aplicações desses materiais nas emissões pela produção das obras de construção.

Ao final são mostrados os regulamentos básicos que orientam a confecção dos relatórios de emissões de gases do efeito estufa pelas empresas brasileiras.

2.1. O EFEITO ESTUFA

A partir da Revolução Industrial devido ao aumento significativo da queima de combustíveis fósseis (carvão mineral e petróleo) pelas atividades humanas, as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2) aumentaram acentuadamente. Na época pré-industrial a concentração de CO_2 que variava de 180 a 280 ppm e chegou em maio de 2013 a ultrapassar 400 ppm (NOAA, 2015). Há pelo menos 800 mil anos e, possivelmente, há mais de cinco milhões de anos, a concentração de CO_2 não atingia níveis tão altos. Ressalta-se que quando isso ocorreu, a temperatura do planeta também subiu (NOAA, 2015; RS & USNAS, 2014).

O entendimento das influências humanas sobre o clima melhorou muito nos últimos anos, levando a um grau de confiança muito alto de que o efeito global das atividades humanas desde 1750 tem sido a mais forte causa do aquecimento da atmosfera do planeta. Portanto, entende-se que cada vez menor a controvérsia sobre o grau de responsabilidade humana nas alterações climáticas e na correlação direta do aumento das concentrações dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera com o aquecimento global (IPCC, 2007a). O relatório de 2013 do IPCC já entende que a influência humana no problema é inequívoca. A mudança no uso da terra (retirada das coberturas vegetais) também contribuiu de forma significativa para o aquecimento da atmosfera,

mas em menor grau de importância que o incremento das concentrações atmosféricas dos GEE (RUUSKA, 2013).

Cabe salientar que ainda existem divergências de opiniões científicas, com a persistência de inúmeras incertezas acerca da contribuição das atividades humanas no aumento da temperatura média do ar na superfície terrestre.

O Sol é uma grande fonte externa de calor para a Terra emitindo radiações, principalmente sob a forma de luz (ondas visíveis), ondas ultravioleta (UV) e ondas infravermelhas (IV) ou radiação de calor. A atmosfera absorve aproximadamente de 25% dessas radiações, 25% são refletidas pelas nuvens para o espaço. A radiação restante (50%) viaja sem obstáculos à Terra, aquece sua superfície e é reemitida a partir da superfície sob a forma de radiação de ondas infravermelhas (IV) ou radiação de calor (NOAA, 2015).

Os GEE atuam na atmosfera prendendo a radiação IV que tenta retornar ao espaço, processo que aumenta a temperatura na atmosfera tal como acontece em uma estufa. Este efeito estufa natural é importante para manter a atmosfera da Terra em uma temperatura habitável, sem o efeito estufa natural a temperatura da atmosfera seria em torno de 15°C mais fria (NOAA, 2015).

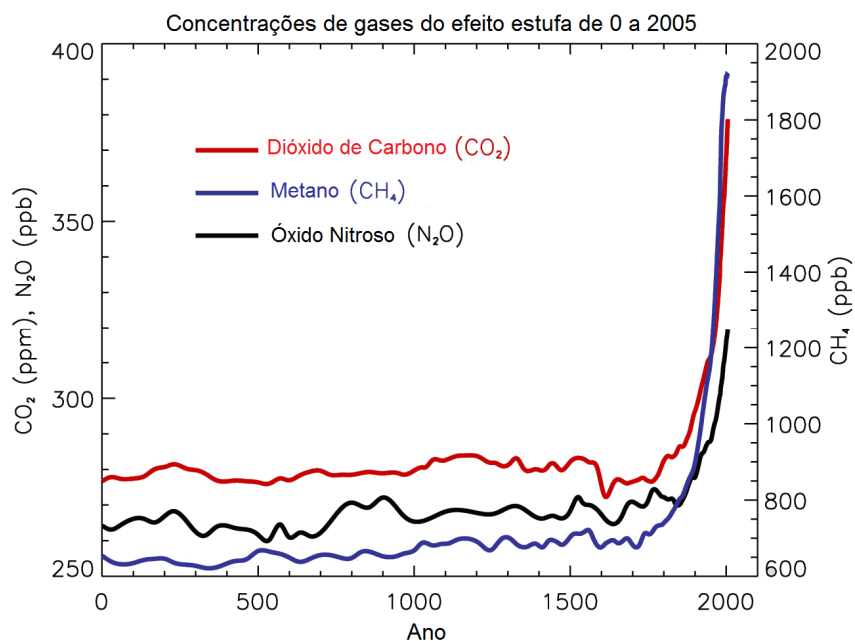
O CO₂ é o mais importante GEE é o causador de aproximadamente 55% das emissões, e é também o GEE mais relevante quanto às emissões de produção dos materiais de construção. Além do CO₂, os GEE incluídos no Protocolo de Quioto, pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2015) totalizam sete: N₂O (Óxido nitroso), CH₄ (Metano), CFC (Clorofluorcarbonetos), HFC (Hidrofluorcarbonetos), PFC (Perfluorcarbonetos) e o SF₆ (Hexafluoreto de enxofre) (IPCC, 2007a). Para se comparar a nocividade do CO₂ com os demais GEE, usa-se o termo CO₂ equivalente ou CO₂e, que relaciona as emissões dos vários GEE baseando-se no potencial de aquecimento global de cada um. Essas relações foram definidas na decisão 2/COP 3 do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), resultando assim em uma métrica comum (IPCC, 2007a). O vapor de água (H₂O) reflete os raios IV, mas não é classificado como um GEE.

O gráfico da Figura 1 apresenta evolução das concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O a partir do ano um de nossa era, mostrando bem claramente o

crescimento vertiginoso das concentrações desses gases a partir do século 19, quando se deu a Revolução Industrial. A Figura 2 mostra o comportamento das temperaturas médias do planeta desde 1880. Observando as evoluções dos dois gráficos (Figuras 01 e 02), percebe-se a contemporaneidade entre os aumentos das concentrações dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O e o aumento das temperaturas da atmosfera da Terra.

O setor industrial da construção e os edifícios prontos (em uso ou operação) são importantes fontes de emissões de GEE. Pode-se dividir a ocorrência dessas emissões em três etapas. As emissões durante a produção dos materiais e da execução da obra, as emissões durante a fase de uso ou operação do edifício e por final as emissões decorrentes da sua demolição (MARCOS, 2009). Projetando uma vida útil para as edificações entre 50 e 100 anos, mais de 80% do consumo de energia, e das emissões de uma edificação residencial se dá durante a sua fase de uso, principalmente devido ao consumo de energia elétrica e gás (MARCEAU e VanGEEM, 2008; IPCC, 2014). Cabe uma ressalva nesta afirmação quanto ao Brasil devido a predominância hidroelétrica de nossa matriz energética.

FIGURA 1 - CONCENTRAÇÕES DE CO_2 , CH_4 , N_2O A PARTIR DO ANO UM



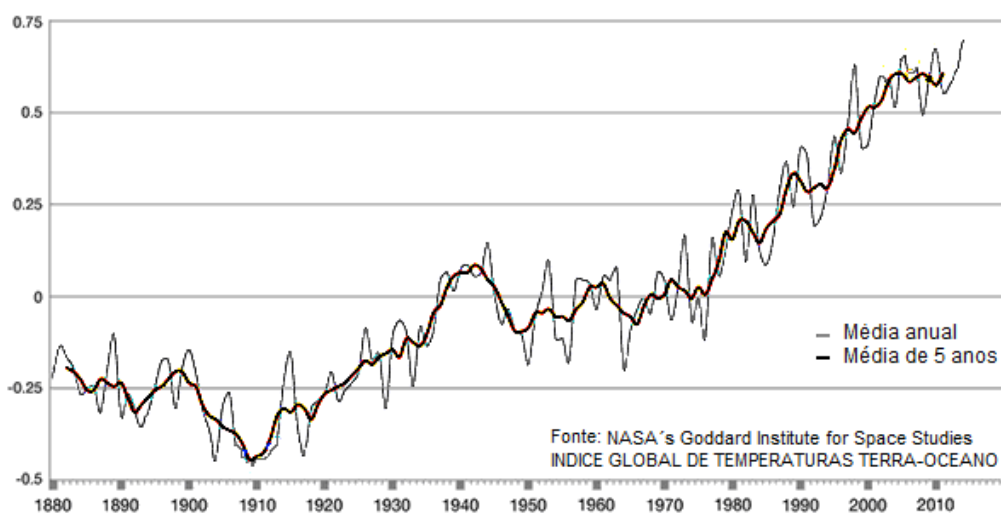
FONTE: IPCC (2007c)

A fase de construção embora menos relevante é significativa, causando emissões de GEE tanto pelo consumo de energia (em especial o consumo de

combustíveis fósseis), quanto pela separação ou retirada do carbono e do oxigênio dos minerais que são matérias-primas dos materiais de construção. Um exemplo importante é o cimento Portland, cuja fabricação é a causa de aproximadamente 7% das emissões mundiais de CO₂, devido a descarbonatação do calcário e ao consumo de combustíveis fósseis (MEHTA, 2001).

Outro exemplo é o aço, durante sua produção ocorre a redução do minério de ferro em altos-fornos, (retirada do oxigênio pela combinação com carbono), e outros processos quase totalmente baseados na queima de carvão. Como consequência, a siderurgia emite grandes quantidades de CO₂. Em 1997, a siderurgia, em todas as suas etapas, foi responsável por 5% das emissões globais de CO₂ (SANDBERG *et al.*, 2001). A execução das obras de construção civil são também intensas consumidoras de matérias-primas, cuja transformação em materiais de construção é fonte de relevantes emissões (BRIBÁN e CAPILLA, 2011).

FIGURA 2 - TEMPERATURAS MÉDIAS DO PLANETA DESDE 1880



FONTE: <<http://climate.nasa.gov/400ppmquotes/>>, Acesso em 28 jul. 2017.

2.2. O SETOR DA CONSTRUÇÃO E OS GEE

O IPCC analisa diretamente as edificações somente na sua fase de operação, focando melhorias em iluminação, aquecimento e usos da energia mais eficientes. A fase de produção na construção é tratada pelo IPCC dentro do setor industrial. As emissões de GEE pela construção são salientadas no

relatório de 2007 (IPCC, 2007a). O IPCC em seu Relatório Síntese (IPCC, 2007b) coloca a construção e uso dos edifícios como um dos setores que tem maior potencial para tecnologias de mitigação de emissões entre os setores industriais investigados.

A produção e o uso de energia contribuem, mais do que qualquer outra atividade humana, para as mudanças que estão ocorrendo na atmosfera. A queima de combustíveis fósseis é responsável, atualmente, por mais da metade de todas as emissões de gases de efeito estufa no mundo (IAC, 2007). Especificamente para as edificações, é crescente o consumo global de energia para aquecimento, arrefecimento, iluminação e outros serviços energéticos relacionados com a fase de operação de uma construção. Como exemplo, pode-se citar que o consumo energético das edificações dobrou entre 1971 e 2002 no mundo (IAC, 2007).

O consumo de energia pelo setor da construção é origem de emissões, mesmo da energia elétrica. A matriz elétrica brasileira ainda é fortemente baseada em usinas hidrelétricas, no entanto já se observa o aumento da produção de energia originária de fontes não renováveis (queima de combustíveis fósseis) (MME, 2016).

Indústrias que fabricam materiais de construção estão entre as maiores consumidoras de energia e maiores emissoras de GEE do país. Exemplos são as indústrias cimenteira, siderúrgica, cerâmica, metais não ferrosos e de mineração (LOBO, SANTOS e TAVARES, 2010). As informações colocadas em Ruuska (2013) e Leggett, Lattanzio e Parker (2009) para o ambiente internacional corroboram esta informação.

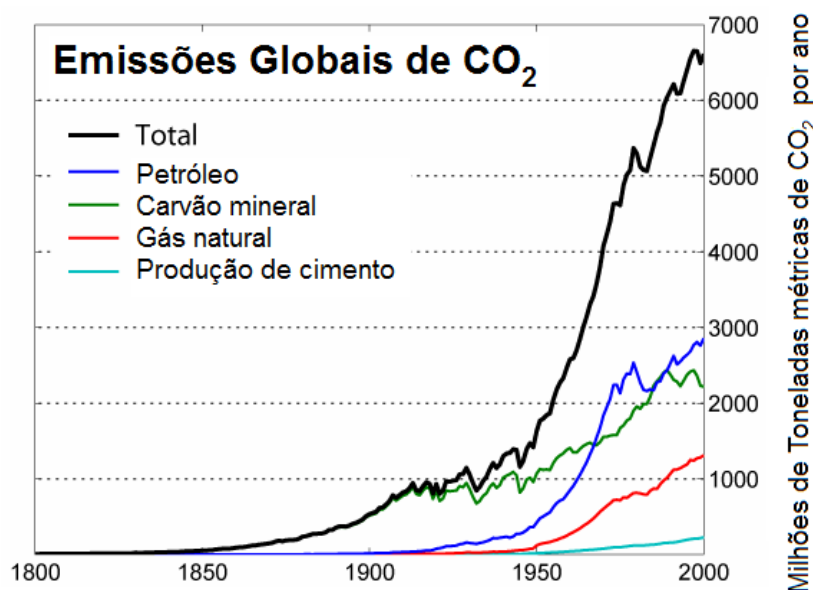
A Figura 3 mostra a importância da queima dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), mas também se observa que a produção de cimento é a segunda maior contribuinte, com aproximadamente com 7% do total.

Devido ao fato da maior parte da energia utilizada em uma obra de construção ocorrer durante a fase de utilização, melhorar a eficiência energética dos edifícios é tarefa importante para reduzir emissões de GEE, mas esta é uma tarefa complexa, exigindo um elevado grau de integração em arquitetura, design, materiais e sistemas de construção. Em especial, o uso de técnicas construtivas e materiais, com o intuito de minimizar o consumo de

energia das edificações durante a sua fase de utilização, têm grande potencial para avanços em eficiência energética, especialmente nos setores de aquecimento e arrefecimento de interiores, com a melhora do isolamento térmico (IAC, 2007).

Cabe aqui a ressalva de que no Brasil a produção de energia elétrica, é em média menos emissora de GEE que na maioria dos países, devido ao uso extensivo da hidroeletricidade.

FIGURA 3 - EMISSÕES GLOBAIS DE CO₂



FONTE: Adaptado de Marland, Boden e Andres (2003).

2.3. OS CONCEITOS DE SEQÜESTRO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO

O termo "armazenamento de carbono" surgiu da necessidade de redução das concentrações de CO₂ na atmosfera. Sequestrar carbono significa aplicar medidas que visem a absorção do excesso do CO₂ da atmosfera, fixando-o de forma o mais permanente possível.

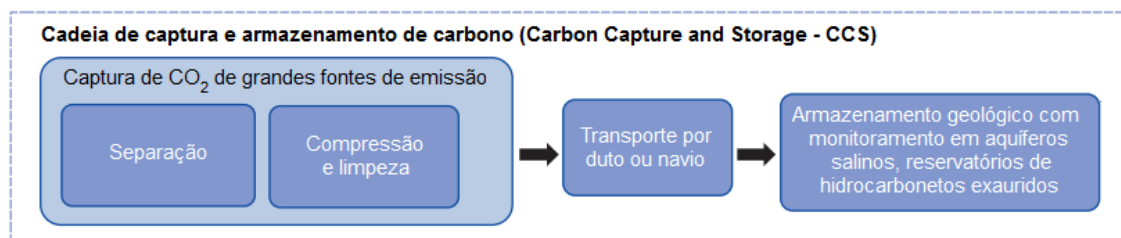
O conceito de armazenamento e armazenamento de carbono foi consagrado pela Conferência de Quioto, em 1997. Este tem por finalidade conter e reverter o acúmulo de CO₂ na atmosfera, visando à diminuição do efeito estufa. O processo natural de remoção de CO₂ por meio de fotossíntese que ocorre nas florestas e nos oceanos minimiza o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera (GRÜTTER, KAPPEL e STAUB, 2002).

O armazenamento e armazenamento artificial de carbono são uma alternativa para minimizar o efeito estufa. Atualmente existe um conjunto de tecnologias que fixa ou armazena o carbono ou o CO₂, de forma permanente.

Já estão em uso ou em testes avançados, tecnologias industriais de armazenamento geológico de CO₂. São técnicas especialmente indicadas para fontes de emissões localizadas, como centrais de energia (que queimam combustíveis fósseis) e indústrias siderúrgicas ou de cimento por exemplo.

O processo mais promissor consiste na injeção de CO₂ liquefeito, (muitas vezes alternando com água), para um reservatório subterrâneo de água salina ou reservatório exaurido de exploração de óleo. O CO₂ dissolvido na água produz inicialmente ácido carbônico e posteriormente íons de carbonato e bicarbonato. A estratificação natural do solo impede a liberação do CO₂ para a atmosfera. Modelagens teóricas preliminares indicam que o prazo de eficiência desta técnica poderia alcançar séculos. Esta tecnologia tem um custo relativamente baixo e têm se provado segura (IEA, 2013). A Figura 4 mostra o esquema da cadeia de captura e armazenamento geológico de CO₂.

FIGURA 4 - ESQUEMA DA CADEIA DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO₂



FONTE: Adaptado de IEA (2013).

As indústrias de petróleo e gás procedem algumas vezes a remoção de CO₂ proveniente de seus gases efluentes da queima de combustíveis fósseis com o emprego de aminas. Esta técnica é realizada sob temperatura e pressão próximas a da atmosfera. Contudo o processo apresenta altos custos operacionais e de implantação (KHOL e NIELSEN, 1997; RAO e RUBIM, 2002).

Cabe salientar que essas técnicas industriais armazenam o CO₂ recém-produzido, evitando novas emissões para a atmosfera, mas não retiram o CO₂ que já está presente no ar.

Uma alternativa promissora que efetivamente retira CO₂ do ar é a fertilização oceânica com ferro. A introdução artificial de ferro nas camadas superiores do oceano estimula a floração de fito plâncton, causando a remoção de CO₂ da atmosfera. O ferro é frequentemente o nutriente limitante para o crescimento do fito plâncton. Este é necessário para a fotossíntese em todas as plantas. Desde 1993 muitas pesquisas internacionais concluíram estudos demonstrando que as florações marinhas podem ser estimuladas pela adição de ferro (BOYD *et al.*, 2007). Contudo existem questionamentos sobre a duração dos seus efeitos. Salienta-se que os seus custos para implementação hoje não são viabilizados economicamente por operações de comércio de créditos de carbono (HARRISON, 2013).

Outra forma “artificial” de armazenamento e armazenamento de carbono e que tem viabilidade econômica, é através do plantio de árvores. As florestas têm grande potencial para remoção de CO₂ da atmosfera em curto prazo. Ao contrário de plantas de ciclo de vida curto que morrem e se decompõem rapidamente, as árvores tem ciclo de vida longo, acumulando carbono em sua biomassa e no solo da floresta (HETSCH, 2008). As florestas retiram o CO₂ da atmosfera por meio da fotossíntese, fixando o carbono e liberando o oxigênio. Uma floresta jovem crescendo de forma acelerada sequestra grandes volumes de carbono (SEDJO, SOHNGEN, e MENDELSON, 2001).

O ciclo do armazenamento de carbono pelas árvores pode ser artificialmente acrescido, não terminando com o crescimento das plantas. As florestas não somente armazenam carbono, mas também fornecem madeira, que pode ser utilizada como material de construção. Materiais de madeira quase sempre têm baixas emissões de CO₂ para sua produção. A madeira aplicada em alguns materiais de construção tem vida útil de algumas décadas, mantendo o carbono imobilizado durante este período. Salienta-se que materiais de construção tradicionais como aço, concreto e cerâmica causam grandes emissões para sua produção e são originários de fontes não renováveis.

Produtos de madeira e derivados, originários da colheita de florestas manejadas, são identificados internacionalmente pelo termo *Harvested Wood*

Products (HWP). Uma floresta manejada pode ser plantada ou natural, mas sempre tem sua exploração desenvolvida de forma sustentável.

O carbono armazenado nos HWP pode permanecer fixado ou armazenado durante um grande período de tempo (décadas), que é o período da vida útil do material. Dessa forma, o carbono não é libertado para a atmosfera imediatamente quando a árvore é cortada e colhida (HETSCH, 2008).

E o ciclo de armazenamento de carbono pela madeira não termina com o fim da vida útil do HWP. Os resíduos de HWP, ao final da sua vida útil, podem ser encaminhados para disposição em aterros sanitários, onde o armazenamento de carbono continua.

Aterros sanitários modernos são rapidamente cobertos com uma camada de solo para criar condições anaeróbicas de decomposição. A deterioração anaeróbica que ocorre através de bactérias não quebra a lignina, criando condições que impedem que muitos dos compostos da madeira como a celulose e a hemicelulose sejam totalmente decompostos. Micales e Skog (1997) em sua pesquisa sobre produtos florestais em aterros sanitários citam que somente de zero a três por cento do carbono presente na madeira é liberado na forma de gás nos aterros sanitários. Sob as condições imperfeitas para microbactérias anaeróbicas que existem nos aterros a maior parte do carbono na madeira permanece intacta (ATHENA, 2012a).

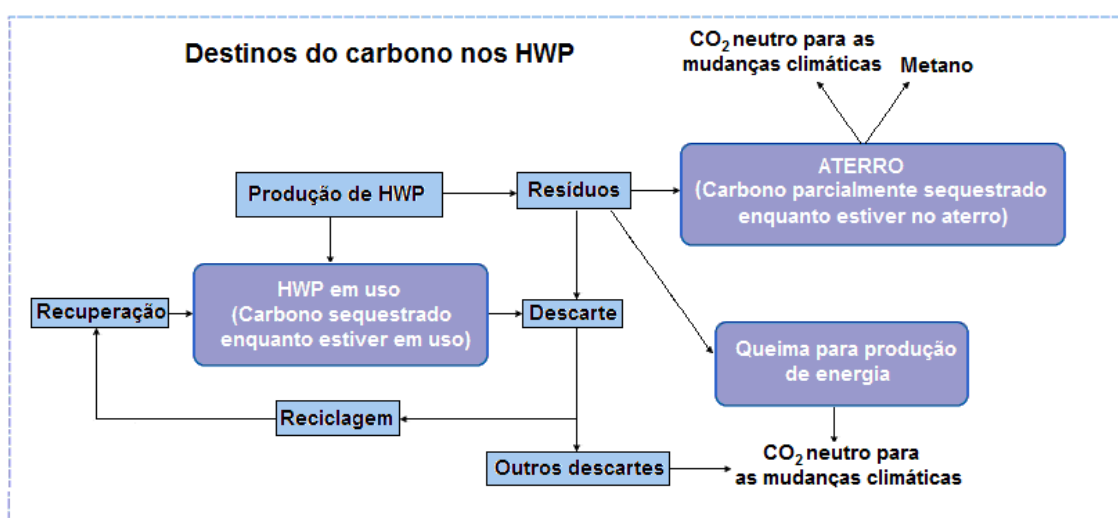
Utilizando as estatísticas da FAO (*Food and Agriculture Organization of United Nations*), o trabalho de Winjum, Brown e Schlamadinger (1998) estimou e indicou que os estoques de carbono armazenado em HWP (produtos em uso e em aterros sanitários), em 1990 estavam aumentando a uma taxa de 139 milhões de toneladas de carbono por ano. Este aumento anual de carbono armazenado em HWP representa uma remoção equivalente de carbono da atmosfera significativamente maior do que as emissões de GEE anuais da indústria global de produtos florestais da época, possivelmente mais do que o dobro.

Dentro desse contexto a importância de se considerar os HWP nos cálculos das emissões de carbono da indústria é clara. Observa-se então que uma forma eficaz que a sociedade atual dispõe para remover o CO₂ presente

na atmosfera é por meio do plantio de florestas, a colheita de seus HWP, a aplicação útil dos HWP por um longo período e a sua posterior disposição em aterros sanitários.

A importância de se considerar os HWP nos cálculos das emissões de carbono da indústria é clara. A Figura 5 ilustra um diagrama com as principais fases da cadeia dos HWP e o destino de carbono durante o uso e descarte do produto.

FIGURA 5 - PRINCIPAIS FASES DA CADEIA DOS HWP E O DESTINO DO CARBONO



FONTE: O autor (2017).

2.4. O IPCC E O CARBONO NOS *HARVESTED WOOD PRODUCTS* (HWP)

Inicialmente a política climática internacional, através do Protocolo de Quioto em 1997, só forneceu aos países a possibilidade de contabilizar o carbono armazenado em florestas. O papel dos HWP na mitigação das alterações climáticas através do armazenamento de carbono já era reconhecido por muitos países, mas o primeiro período de compromisso do Protocolo de Quioto não permitiu a sua contabilização. As negociações no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC - *United nations framework convention on climate change*) sobre o período pós-2012 proporcionaram meios para possíveis inclusões dos HWP (ITTC, 2015).

O Protocolo de Gases de Efeito Estufa ou *GHG Protocol* é a ferramenta de contabilidade internacional mais amplamente utilizada pelos governos e empresas para entender, quantificar e gerenciar as emissões de GEE. Serve como a base para quase todos os padrões de GEE internacionais para preparação de inventários nacionais ou de empresas individuais, seguindo as normas da *International Standards Organization* (ISO). O *GHG Protocol* define o carbono "biogênico", como o produzido por organismos ou processos biológicos (por exemplo, crescimento florestal), mas não o carbono fossilizado ou obtido a partir de fontes fósseis (WRI, 2004).

As emissões e armazenamento artificial de carbono podem ser vistos como parte de um ciclo natural. Por este motivo as emissões e o armazenamento de carbono biogênico devem ser contabilizados na “pegada” de carbono de um produto, a fim de cobrir o ciclo de vida completo desse (IPCC, 2006a; HETSCH, 2008).

A mitigação das emissões de GEE devida ao carbono presente dos produtos de base de madeira é um tema ainda debatido. A principal razão para a inclusão de armazenamento de carbono dos HWP na contabilização do CO₂ nas avaliações de ciclo de vida (ACV) é que as florestas geridas de forma sustentável têm fluxo neutro de carbono em longo prazo. O que significa que o carbono armazenado em uma floresta pode variar com o crescimento e perturbações, (por exemplo, na queima), mas em um longo prazo não aumenta nem diminui o estoque de carbono.

Florestas não exploradas, eventualmente atingem um estado de maturidade em que já não removem mais qualquer carbono da atmosfera. Este fato comprova que o armazenamento de carbono nos HWP é adicional ao carbono armazenado na floresta (ATHENA, 2012a).

Na maioria dos países, o efeito de substituição de produtos que produzem emissões de GEE por HWP já é considerado na mitigação das mudanças climáticas. A contabilização do carbono armazenado ou armazenado permanentemente nos HWP ajudaria inclusive a incentivar a exploração florestal sem perder o valor da cota de carbono armazenado ou armazenado nas florestas (HETSCH, 2008).

O estoque de carbono nos HWP tem aumentado significativamente em muitos países nos últimos anos, assim este estoque pode influenciar o equilíbrio de carbono atmosférico no curto e médio prazo, embora a sua contribuição para o balanço global de carbono ainda seja relativamente pequena. Numa perspectiva de longo prazo, os estoques HWP acabarão por estabilizar (HETSCH, 2008).

O IPCC em 2007 (*Revised 1996 IPCC Guidelines*) recomendou como abordagem padrão, que todas as emissões de CO₂, as remoções associadas à exploração florestal e a oxidação de HWP deveriam ser contabilizadas pelo país produtor no ano de colheita florestal. O método proposto recomendava que o armazenamento de carbono nos HWP deveria ser incluído em um inventário nacional somente para países os quais pudessem documentar que as quantidades de HWP duráveis estão aumentando (IPCC, 2007a).

Em 2007, a UNFCCC na sua 26^a sessão SBSTA (*Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice* /2007/4, parágrafos 59-61), decidiu discutir as questões relacionadas aos HWP, as quais foram consideradas em conjunto com o item da agenda SBSTA sobre as orientações do IPCC para inventários de GEE nacionais. O SBSTA lembrou que na sua 24^a sessão, recomendou que os países condições de fazê-lo poderiam relatar voluntariamente os estoques de carbono nos HWP em seus inventários nacionais, de forma coerente com as diretrizes da UNFCCC/SBSTA/2006/5, parágrafo 68 (UNFCCC, 2015).

Cabe ressaltar que o Protocolo de Quioto prevê um mercado internacional em que o armazenamento de carbono, promovido pelo crescimento de florestas, pode ser transformado em títulos negociáveis entre governos e empresas dos países signatários, entre os quais está o Brasil.

2.5. SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO PARA GESTÃO FLORESTAL

Para promover o princípio da gestão florestal sustentável e fortalecer o setor, deve-se assegurar que não ocorram efeitos perversos como o desmatamento, degradação florestal, perda de biodiversidade ou outras funções florestais, devendo-se promover o princípio da gestão florestal sustentável (HETSCH, 2008). Para se alcançar esse objetivo, é necessário diferenciar a madeira de origem legal e ilegal, isso é feito a partir de selos de certificação. Existem o sistema de certificação internacional da madeira *Forest*

Stewardship Council (FSC ou Conselho de Manejo Florestal) e brasileiro, que segue as normas da ABNT, o CERFLOR (NBR 14789, 2012).

O FSC é uma organização não governamental independente, fundada em 1993 com o objetivo de promover o manejo florestal responsável. Tem sede em Bonn, Alemanha, e é representado em mais de 70 países. Através de seu sistema de certificação, o selo FSC reconhece a produção responsável de produtos florestais, permitindo que os consumidores e as empresas tomem decisões conscientes de compra, beneficiando as pessoas e o ambiente e agregando valor aos negócios (FSC, 1996).

O sistema de certificação florestal CERFLOR foi desenvolvido, em 2002 se tornando operacional em 2003, no âmbito do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade da NBR 14789:2012. A ABNT o desenvolveu, incluindo princípios, critérios e indicadores para as florestas plantadas e princípios, critérios e indicadores para as florestas nativas, bem como as normas para a cadeia de custódia e auditoria. O Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial (INMETRO) é o organismo de que definiu as diretrizes e regulamentos de avaliação de conformidade e acreditação dos certificadores (Lei n.º 5.966, de dezembro de 1973).

2.6. O CARBONO FIXADO NA MADEIRA

A fixação do elemento químico carbono é extremamente eficiente para a mitigação das emissões do CO₂. Cabe observar que como a molécula de CO₂ possui dois átomos de oxigênio e um único átomo de carbono, e que a massa molar de um átomo de carbono é aproximadamente 12 e a de um átomo de oxigênio de aproximadamente 16. Dessa forma, cada unidade de massa do elemento carbono fixada, evita que 3,67 unidades de massa da molécula de CO₂ sejam emitidas para a atmosfera.

A madeira é composta predominantemente por duas moléculas que contêm grandes quantidades de carbono, a celulose e a lignina. A celulose, cuja molécula básica é C₆H₁₀O₅, contém 44,4% de sua massa molecular em carbono, a lignina que tem a molécula básica de C₉H₁₀O₂, C₁₀H₁₂O₃, C₁₁H₁₄O₄, contém 66,6% de sua massa molecular carbono.

As madeiras em geral contêm em sua estrutura de 40 a 50% de sua massa seca em carbono. Oliveira *et al.* (2011) em seu trabalho, relacionam medições da biomassa seca de madeira para as principais espécies da região de Curitiba, chegando a valores da ordem de 45% de sua massa em carbono. O estudo de Dallagnol *et al.* (2011) com cinco espécies comumente usadas em reflorestamentos no sul do Brasil encontrou valores variando de 42,20% a 45,36% de sua massa em carbono, conforme a espécie, e conforme o compartimento (parte) da árvore que se procedeu a amostragem. Portanto, em regra geral, uma unidade de massa de madeira armazena carbono que equivale a não emissão 1,46 a 1,83 unidades de massa de CO₂.

Ruuska (2013), na publicação *Carbon Footprint for building products - ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products*, apresenta os cálculos das pegadas de carbono e quantidades de carbono armazenado ou armazenado em diversos produtos de madeira para a construção. Para chapas de madeira (OSB, compensados, painéis de MDF e HDF) o estudo apresenta uma média de armazenamento de carbono que representa 1,52 unidades de massa de CO₂ por unidade de massa do produto. Para vigas de madeira maciça e peças de madeira colada, o mesmo estudo apresenta uma média de 1,51 unidades de massa de CO₂ por unidade de massa do produto.

2.7. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS E DOS EDIFÍCIOS

Avaliação do Ciclo de Vida, ou ACV, é uma análise sistemática que identifica e quantifica os fluxos de energia e de massas de materiais, para determinar os impactos ambientais resultantes de processos, serviços e produtos ao longo de seu ciclo de vida. A ACV tem como uma das suas finalidades permitir a comparação de alternativas com base nos impactos ambientais dos processos, serviços e produtos, principalmente no aspecto das mudanças climáticas.

Em uma ACV completa, todas as fases do ciclo de vida precisam estar incluídas (NBR ISO 14044, 2009), chamando-se então de uma ACV do “berço-ao-túmulo”. Uma ACV pode ser parcial, ou com limites do sistema diferentes ou ainda apresentar os resultados para diversos limites. As designações dos limites iniciam por “berço”, quando envolvem desde a extração da matéria-

prima. Iniciam por “portão”, quando iniciam já dentro de uma unidade de produção, terminam em “portão” quando não consideram os fatos depois da saída da unidade de produção e terminam com “túmulo”, quando consideram também o fim da vida útil do produto, como o aterro ou a reciclagem. Os estudos podem ser completos ou do “berço-ao-túmulo”, “berço-ao-portão com opções”, ou envolvendo etapas fora da unidade de produção, ou do “berço-ao-portão de saída da indústria”.

A pegada de carbono é uma das categorias de impacto de uma ACV, que é colocada como Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* ou GWP), a partir das emissões de GEE em unidades de CO₂e. Uma ACV pode fornecer uma melhor compreensão dos impactos causados por produtos diferentes ao longo de seu ciclo de vida, facilitando soluções eficazes de mitigação das mudanças climáticas na confecção dos projetos de edificações (KUITTINNEN, LUDVIG e WEISS, 2013).

As normas europeias dividem as ACV relativas a uma obra de um edifício em dois níveis, um de produtos e outro da construção. A EN 15804:2014 se concentra no nível de produto e seus impactos ambientais. A EN 15978:2011 se concentra no nível da construção, ou seja, avaliação do desempenho ambiental dos edifícios.

No caso específico de HWP, uma ACV deve-se levar em consideração a extração da matéria-prima e seu processamento, transporte e processos de fabricação. Devendo estar inclusos todos os materiais envolvidos, produtos e energia, até à fase de processamento e eliminação de resíduos finais. Como a silvicultura é uma importante fonte de matérias-primas para HWP, uma ACV da silvicultura deve levar em consideração o cultivo e plantio de árvores, bem como o uso de fertilizantes e pesticidas, além de todo o trabalho de máquinas, bem como infraestrutura, transporte, manutenção e processos de colheita na floresta (KUITTINNEN, LUDVIG e WEISS, 2013).

Na fase de produção dos HWP, todos os insumos materiais e energia para a unidade de produção devem ser incluídos. Subprodutos como resíduos, serragem ou cascas, que são normalmente utilizados para a produção de energia devem ser considerados. Ao final da vida útil os processos de

demolição, transporte, transformação e eliminação de resíduos também devem ser igualmente contabilizados (KUITTINNEN, LUDVIG e WEISS, 2013).

Virtualmente toda ACV sofre algum nível de simplificação, utilizando-se de bases de dados existentes para que sejam possíveis reduções do escopo. O uso de dados secundários de alguma base apresenta algumas dificuldades, como encontrar um produto ou processo similar, e a variabilidade dos processos ao longo do tempo, que são fatores que aumentam a incerteza (JOHN, 2013).

É importante ressaltar que para cada produto e planta industrial ocorrem condições específicas, como consumos específicos, matriz de energia elétrica, sistemas modais de transporte e matérias-primas, de forma que os resultados são restringidos às condições específicas da indústria de cada estudo.

Um documento que é o sumário dos dados colocados em uma ACV de um produto relacionado é o *Environmental Product Declaration* (Declaração Ambiental do Produto) ou EPD, que é baseado na norma de aplicação voluntária ISO 14025:2006. Existem no Brasil documentos produzidos pelos fabricantes, que são chamados de DAP, mas que não seguem de forma alguma as normas internacionais nem a correspondente brasileira NBR ISO 14025:2015.

A EN 15804:2014 prevê para os produtos que armazenam carbono de origem não fóssil, como o fixado na madeira, por exemplo, que as quantidades desse carbono armazenado ou armazenado sejam explicitadas ao final do relatório e não subtraídas diretamente da sua pegada de carbono. O carbono armazenado ou absorvido deve estar presente no item D (Benefícios além dos limites do sistema, reuso, reciclagem e recuperação).

A confecção de uma ACV de um produto industrial deve considerar nas suas informações de entradas as emissões e armazenamentos de carbono de suas matérias-primas. O resultado final será o somatório das entradas anteriores aos limites da ACV com as emissões dentro dos limites desta. As ACV e os EPD de produtos com madeira devem mostrar as quantidades de CO₂e emitidos pela produção e as quantidades de CO₂ não emitidos com o armazenamento ou a fixação do carbono.

Um edifício é um sistema muito complexo, pois é composto por uma grande quantidade de materiais e equipamentos. Um edifício completo pode ser analisado por meio de uma ACV, cuja modelação começa no nível do local de implantação da obra e dos materiais de construção utilizados. Existem várias fases distintas no ciclo de vida de um edifício. A primeira é a fase das obras de construção, incluindo a extração e a transformação das matérias-primas em materiais de construção. A segunda fase ocorre durante a ocupação ou utilização do edifício, incluída a sua manutenção. A terceira fase é a de demolição do edifício e descarte ou reutilização do material de demolição. O transporte está envolvido em todas as etapas (KUITTINNEN, LUDVIG e WEISS, 2013).

A pegada de carbono de um produto é a soma das emissões e absorções de GEE que é liberada para a atmosfera, expressa em termos de CO₂ equivalente (CO₂e) com base em uma ACV. A soma é feita, para transformar os outros GEE em CO₂e, considerando os fatores de ponderação do IPCC para 100 anos (ISO/TS 14067, 2013).

O carbono tem um ciclo através dos ecossistemas, onde se apresenta de uma variedade de formas. O carbono tem forte tendência de ser atraído pelo oxigênio e formar compostos gasosos como o CO₂ e o monóxido de carbono ou CO. Ambos os gases em concentrações elevadas podem ser considerados poluentes atmosféricos e desempenham um papel na alteração do clima. O processo da fotossíntese remove o CO₂ da atmosfera e fixa o carbono nas diversas espécies do reino vegetal, em especial as árvores, liberando o oxigênio da molécula. Este processo envolve o armazenamento, para dentro das células vegetais, fixando o carbono em moléculas sólidas de açúcares (glicose e hidratos de carbono e amido), que são armazenadas nas estruturas celulares das folhas, caules, troncos, ramos e raízes, contribuindo para o crescimento das árvores. Portanto, os produtos de madeira e derivados contêm quantidades relevantes de carbono em suas estruturas (LE MOS e STRADIOTTO, 2012).

Ainda não existem normas brasileiras com recomendações para os cálculos da pegada de carbono de um produto, as regulamentações

disponíveis são da ISO. A pegada de carbono de um produto está ligada à análise da ACV do mesmo e ligada as suas emissões de carbono.

O documento normativo internacional que trata exclusivamente da pegada de carbono de produtos é a ISO/TS 14067:2013 - *Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication*, (Pegada de carbono dos produtos - Requisitos e orientações para a quantificação e comunicação). Esta norma fornece recomendações para levantamentos de qualquer tipo de produto. Especificamente em relação a produtos de madeira esta norma foi submetida para estudos no Comitê Europeu de Normas para o desenvolvimento de normas específicas. Um dos primeiros resultados é a norma EN 16449:2014 - *Wood and wood-based products - Calculation of sequestration of atmospheric carbon dioxide*, (Madeira e produtos de madeira - Cálculo de armazenamento de dióxido de carbono atmosférico), contém regras que podem ser aplicadas para o cálculo da pegada de carbono de um material de madeira, ressaltando que só é aplicável a um material de madeira, não a produtos à base de madeira.

Outras normas internacionais relevantes são a EN 15804:2014, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*. Esta norma regula o conteúdo e a estrutura das EPD, para produtos de construção em geral, que leva em conta as características específicas dos diferentes materiais de construção para facilitar comparações para compradores. Existe também a EN 16485:2014, *Round and sawn timber — Environmental Product Declarations — Product category rules for wood and wood-based products for use in construction*, (Regras das categorias de produtos para madeira e à base de madeira para uso em construção - redondas e madeira serrada - declarações ambientais de produto), que foi especificamente desenvolvida para produtos à base de madeira e uso em construção.

Para os produtos de madeira e derivados, além do fator de emissão (FE), outra informação fundamental é a quantidade de carbono armazenada ou armazenada, que é a massa de carbono fixada no produto final. Alguns autores colocam esta informação na forma de CO₂ não emitido, sendo então necessária a multiplicação da massa de carbono por 3,67 (RUUSKA, 2013).

Portanto, o potencial de mitigação dos GEE da madeira e derivados produzidos sustentavelmente é muito grande, quando se considera seu uso em materiais de construção que permanecerão na edificação por muitos anos. Alguns autores colocam a vida útil de uma porta de madeira entre 50 a 150 anos (MENET e GRUESCU, 2012). Cabe ressaltar que os materiais de construção de madeira podem ser reciclados e, ao final de sua vida útil, o armazenamento de carbono permanece nos aterros sanitários por muitos anos.

2.8. AS REDUÇÕES DE EMISSÕES DEVIDO AO USO DOS HWP

A madeira é uma matéria-prima única em comparação com os principais materiais de construção, pois esta armazena uma quantidade significativa de carbono de origem biogênica na sua massa.

Os HWP podem atuar minimizando as emissões de GEE nos materiais de construção de duas formas. Para gerar energia em substituição de combustíveis fósseis durante a fase de produção de materiais, em especial para os que demandam o uso intensivo de energia durante a sua fabricação. Ou em HWP que podem ser usados diretamente como materiais de construção de/ou com madeira, substituindo materiais tradicionais emissores de GEE.

Gustavsson (Departamento de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da *Mid Sweden University, Östersund*, Suécia), coloca que os HWP podem colaborar para reduzir as emissões totais de um país (HETSCH, 2008). Essas reduções se devem ao fato de que a produção de HWP demanda consideravelmente menos energia em comparação com materiais tradicionais como o aço, o concreto e o alumínio. Também a utilização de resíduos de HWP como biocombustíveis permite a redução das emissões do processo de fabricação de materiais de construção. Ainda o armazenamento físico de carbono nas florestas e nos HWP permite a mitigação de emissões.

Gustavsson também afirma que a contabilização dos HWP melhora a precisão das avaliações das emissões de GEE em comparação com a abordagem padrão IPCC. Os países que elegeram o manejo florestal como atividades suplementares nos termos do artigo 2.4 do Protocolo de Quioto devem justificar a utilização dos HWP, a fim de não penalizar o manejo florestal no futuro (HETSCH, 2008).

Outra característica interessante é que os HWP tendem a requerer menos energia para o seu processamento. Essa característica natural é uma vantagem ambiental dos HWP. Ao aumentar-se em um edifício, na utilização de HWP, o armazenamento de carbono aumentará e o uso total de energia primária na fase de construção diminuirá. Desta maneira valiosos recursos energéticos poderão ser poupados (KUITTINNEN, LUDVIG e WEISS, 2013).

Observando os resultados para os diversos HWP relacionados em Ruuska (2013), verifica-se que mesmo os HWP mais elaborados do ponto de vista industrial, como as chapas de partículas de madeira (MDF ou MDP), armazenam mais carbono em sua massa do que emitem pela sua produção. Portanto tem emissões líquidas negativas. Um detalhe importante é que embora estes materiais consumam razoáveis quantidades de energia durante sua produção, a maior parte desta energia é oriunda da queima de resíduos vegetais da matéria-prima, o que torna essas emissões neutras em carbono.

O IPCC coloca que é favorável à substituição dos materiais tradicionais à base de aço e cimento por HWP duráveis. Esta ação provoca a transferência de carbono da biomassa florestal para dentro das construções. Também a redução do uso de energia baseada em combustíveis fósseis na fabricação de produtos à base de cimento e outros materiais de construção não madeireiros minimizam as emissões da indústria da construção (IPCC, 2007a).

Gustavsson e Sathre (2006) procederam a uma ACV comparativa de um edifício com estrutura em madeira de vários andares com um edifício funcionalmente equivalente feito com estrutura em concreto armado, ambos construídos na Suécia. Os efeitos da substituição de concreto armado para estrutura em madeira mostraram que foi necessária menos energia para produzir os materiais de construção utilizados e que esta substituição causou menores emissões de CO₂. As reduções das emissões foram de 110 a 470 kg de CO₂ por metro quadrado de área construída.

Como a energia necessária para produzir e transportar produtos florestais é menor do que a necessária para produtos tradicionais, como o aço, o cimento Portland, as cerâmicas e o alumínio, e esta energia é baseada em muito na queima de combustíveis fósseis, grandes emissões de CO₂ podem ser evitadas por meio da utilização de produtos florestais (IPCC, 2001).

O estudo publicado por Buchanan e Levine (1999) mostra que quando a madeira é usada na construção civil substituindo os materiais que necessitam intensivamente de energia para sua produção, ocorrem reduções de emissões de CO₂. O estudo demonstra que na construção de edifícios pequenos na Nova Zelândia, as reduções de emissões de CO₂ foram maiores ainda com as mitigações obtidas com o carbono armazenado pelos produtos de construção de madeira utilizados.

Bergman *et al.* (2014) desenvolveram um estudo para uma casa de 191,5 m² com estimativas baseadas em ACV de produtos a base de madeira de origem florestal sustentável, onde foram comparadas com alternativas com produtos “não-de-madeira”. No estudo foram analisados como alternativas aos produtos de madeira, produtos equivalentes como estruturas em aço e concreto, divisórias e forros em PVC, pisos vinílicos entre outros. Foi estimada a pegada de carbono de cada produto de madeira usando fluxos mostrados para o sistema na Figura 07. O fluxo de carbono para cada alternativa de produto “não-de-madeira” (Figura 06) foi feito com base nas emissões de combustíveis fósseis. Foi estimado que a casa de 191,5 m² utilizaria 6.123,5 kg de madeira serrada, 1.433,4 kg de madeira compensada, 2.934,7 kg de placas OSB (*Oriented Strand Board*) e 404,6 kg de painéis laminados unidirecionais (LVL *Laminated Veneer Lumber*). Obtendo-se o total de 10.886,2 kg de madeira com 12% de umidade ou 9.525,4 kg de madeira seca. Foi considerado que a madeira comum contém cerca de 50% de carbono por peso. Portanto uma casa 191,5 m² poderia armazenar 4.762,7 kg de carbono ou 17.463,3 kg de CO₂, assumindo que a umidade é de 12%.

Como conclusões, o estudo calculou que as reduções nos impactos de emissões de carbono associadas à utilização de biocombustíveis e o armazenamento de carbono em produtos de madeira duráveis, resultaram em menores emissões líquidas de carbono dos produtos de madeira em comparação com alternativas de produtos “não-de-madeira”. Para os casos avaliados as reduções de emissões de GEE combinadas devido ao uso de biocombustíveis, o armazenamento de carbono pelos HWP e as emissões evitadas pela não utilização de combustíveis fósseis, são sempre maiores do que as emissões de carbono devido à fabricação dos produtos de madeira.

de carbono para HWP pode variar entre as regiões, devido às diferenças na composição de espécies e a quantidade de energia necessária para a secagem. No entanto, essas diferenças são relativamente pequenas (BERGMAN *et al.*, 2014).

2.9. OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO À BASE DE MADEIRA

Como já citado, os materiais à base de madeira são grandes fixadores de carbono, tendo em vista que a massa de carbono representa de 40 a 50% da massa seca da madeira (OLIVEIRA *et al.*, 2011). Outra informação também já exposta é de que os materiais de madeira e derivados produzem bem menos emissões que a maioria dos demais materiais de construção (BERGMAN *et al.*, 2014).

Como existem muitos tipos diferentes de HWP e com níveis diferentes de industrialização e processamento, e com o intuito de provar essas afirmações, a seguir está apresentada uma série de estudos mostrando as quantidades de CO₂e emitidos pela produção dos materiais e as quantidades de CO₂ não emitidos pela fixação do carbono.

Os valores de CO₂ e CO₂e citados foram obtidos a partir de parâmetros de ACV dos produtos ou de EPD. As normas seguidas para os estudos são a ISO/TS 14067:2013, que especifica princípios, requerimentos e linhas de guia para quantificação das pegadas de carbono dos produtos. Os padrões de ACV seguem a série de normas NBR ISO 14040:2009. Para cada material estão também apresentadas sua região de origem, a ACV ou EPD fonte das informações, assim como breves descrições de suas características e seus processos de fabricação.

Os valores de emissões CO₂e apresentados são relativos à produção dos materiais, retirados de ACV ou de EPD relativa ao produto, considerando os limites dos sistemas citados.

A produção de HWP utiliza correntemente energia térmica (e vapor) originária da queima de resíduos florestais ou de resíduos de madeira da própria indústria. O CO₂ proveniente da combustão dessas fontes é considerado biogênico e não é considerado um GEE pela razão de que o seu ciclo de vida de carbono é um circuito fechado em que o CO₂ biogênico é

reabsorvido pelo crescimento de árvores, libertando o oxigênio para a atmosfera e consumindo o carbono para obter mais madeira (USEPA, 2003). Por esta razão, as ACV e EPD citados como fontes de informações a seguir, não contabilizam o CO₂ biogênico.

Os fatores de emissões (FE) são apresentados por kg e m³ do produto, sendo também mostrada a densidade do mesmo para que seja possível o cálculo das emissões do produto para qualquer conjunto de dimensões. Os valores de CO₂e apresentados são a soma das emissões durante toda a fase de produção, calculadas com a ajuda de fatores de ponderação IPCC (para 100 anos). Os valores de CO₂e apresentados são o equivalente neste gás ao carbono armazenado pelo produto, também mostrados por g por kg e kg por m³.

A seguir estão colocadas informações relevantes para este estudo, sobre os principais materiais de construção de madeira e derivados, ou HWP que são aplicados em obras comuns de construção de edifícios no Brasil, em utilizações de forma permanente, isto é, uso não provisório. Iniciam-se pela madeira serrada, painéis diversos (compensados, OSB - *Oriented Strand Board*, MDF - *Medium Density Fiberboard*, HDF - *High Density Fiberboard*), pisos laminados e pisos maciços de madeira. As informações colocadas são derivadas de ACV e EPD, consistindo em uma descrição rápida do processo de produção, alguns diagramas dos limites dos sistemas utilizados, e principalmente os fatores de emissões de CO₂e pela produção; além das quantidades de CO₂ armazenados em cada um dos produtos.

Cabe salientar que os sistemas de produção analisados variam para cada planta industrial e seu produto. Características como distâncias de transporte, eficiência dos equipamentos, combustíveis utilizados, entre outros, influenciam as quantidades de emissões de CO₂e pela produção. Outro detalhe que envolve variações significativas nas emissões dos produtos florestais é a origem da floresta. Florestas plantadas causam emissões maiores devido às operações de plantio, manutenção e colheita. O CO₂ armazenado não é obrigatoriamente considerado nas ACV, portanto algumas vezes não é disponível.

2.9.1. PRODUTOS DE MADEIRA SERRADA

A produção da madeira serrada envolve duas fases, uma de operações florestais e a outra na serraria. Conforme a origem da floresta, plantadas ou naturais, são emitidas quantidades diferentes de GEE para se extrair as toras de madeira, sempre considerando a exploração florestal sustentável e a madeira de origem certificada. Para as florestas plantadas existem as operações de preparo da terra, plantio e manutenção até o momento do corte, para as florestas naturais não. Essas situações são muito parecidas no Brasil e nos EUA, lá como aqui, as madeiras duras são exploradas de florestas que crescem naturalmente. Considerando somente a atividade de exploração florestal, os sistemas de ACV analisados incluem serviços na floresta e na serraria. Na floresta são consideradas as operações de derrubada das árvores, a transformação em toras, o transporte em caminhão até a serraria (PE INTERNATIONAL, 2012).

Nos subsistemas das serrarias são considerados a triagem, o armazenamento das toras, o descascamento (a casca é um subproduto), o corte das toras em peças de madeira, o transporte para as instalações de secagem, o processo de secagem dos produtos, a manutenção de todos os equipamentos e os processos de tratamento de resíduos. As maiores emissões (8 a 32% do total) são decorrentes do processo de secagem, quando se reduz o teor de umidade de aproximadamente 30% para em torno de 10% (PE INTERNATIONAL, 2012).

Outros detalhes que afetam os resultados das ACV são as diferenças nas emissões, causadas pelo processamento de espécies de madeiras de diferentes, e diversos tipos e espessuras de produtos. Por exemplo, o impacto de produzir uma espécie de madeira dura, com toras compridas pode ser duas vezes mais elevado do que uma espécie plantada, com toras curtas, que tem secagem rápida. Do mesmo modo, o impacto da produção e fornecimento de peças mais espessas (com 5 cm) pode ser mais do dobro do que com 2,5 cm, se todas as outras propriedades do produto forem as mesmas (PE INTERNATIONAL, 2012).

Considerando somente as emissões do subsistema de produção das florestas plantadas gêneros *Pinus* e *Eucaliptus*, englobando o preparo do solo,

o plantio de mudas, a manutenção da floresta, a colheita e o transporte das toras até a indústria, Silva (2012) em uma ACV para a produção de painéis MDP levantou, por duas metodologias diferentes, que as emissões alcançam valores de 26,98 e 27,13 kgCO₂e por m³.

Considerando o conjunto das atividades anteriormente citadas, uma ACV desenvolvida para produtos de madeira serrada, para o *American Hardwood Export Council* pela PE INTERNATIONAL (2012), para produtos com 2,5 cm de espessura, secos em estufa, apresenta os valores de emissões e armazenamento de CO₂ para 19 espécies dos EUA, que estão mostradas na Tabela 1.

TABELA 1 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA MADEIRA SERRADA DOS EUA

Espécie:	FE kgCO ₂ e por m ³	CO₂ armazenado kgCO ₂ por m ³
<i>Ash</i>	407	974
<i>Aspen</i>	325	603
<i>Basswood</i>	330	603
<i>Beech</i>	377	1.073
<i>Birch</i>	385	997
<i>Cherry</i>	301	812
<i>Cotton-wood</i>	373	650
<i>Elm</i>	357	857
<i>Sap gum</i>	368	789
<i>Hackberry</i>	340	857
<i>Hickory</i>	463	1.206
<i>Hard maple</i>	394	1.020
<i>Soft maple</i>	390	1.125
<i>Red oak</i>	496	1.020
<i>White oak</i>	556	1.114
<i>Pecan</i>	386	1.067
<i>American Tulipwood</i>	270	650
<i>Walnut</i>	427	882
<i>Willow</i>	310	603

FONTE: PE International (2012).

Novamente considerando o conjunto completo das atividades citadas, Punhagui *et al.* (2012) desenvolveram uma ACV simplificada, para produtos de madeiras brasileiras serradas, originárias de florestas plantadas e florestas nativas. A ACV apresenta que para a produção de madeira serrada de florestas

plantadas ocorrem emissões de 33 a 339 kgCO₂e por m³, para madeira de florestas nativas 5,5 a 49,6 kgCO₂e por m³. Esta ACV simplificada foi desenvolvida considerando as atividades de produção de mudas até o portão de entrada do consumidor, de tanto para floresta plantada e de madeira nativa, sem o processo de secagem dos produtos.

Érica Campos em sua dissertação para madeiras amazônicas, em 2012, determinou emissões de CO₂, através do consumo energético, para madeira serrada, sem o processo de secagem, transportada até o sudeste, uma variação estimada entre 75 kgCO₂e por tonelada e 284 kgCO₂e por tonelada, com mediana de 138 kgCO₂e por tonelada. Considerando uma densidade média para a madeira em umidade de equilíbrio de 0,81 g/cm³. Os valores por volumes são 60,7 kgCO₂e por m³ e 230,0 kgCO₂e por m³, com mediana de 111,8 kgCO₂e por m³.

O relatório *Carbon Footprint for Building Products* (RUUSKA, 2013), apresenta para produtos de madeira serrada, produzidos na Alemanha e na Finlândia, valores de emissões e armazenamento de carbono para produtos em umidade de equilíbrio com o ar. Estes valores estão apresentados na Tabela 2. Os limites dos sistemas das ACV utilizadas por esta publicação são do “berço-ao-portão de saída da indústria”, de acordo com a EN 15804 (2014).

TABELA 2 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA MADEIRA SERRADA DA ALEMANHA E DA FINLÂNDIA

Madeira / Origem	Densidade básica (h%=10,7) g por m ³	FE gCO ₂ e por kg	CO ₂ armazenado gCO ₂ e por kg	FE kgCO ₂ e por m ³	CO ₂ armazenado kgCO ₂ e por m ³
Coníferas - Alemanha	484,5	119,2	1.636,9	57,8	793,1
Folhosas – Alemanha	761,6	167,4	1.636,0	127,5	1.246,0
Finlândia (<i>Pine</i>)	420,0	108,1	1.638,7	45,4	688,3
Finlândia (<i>Spruce</i>)	380,0	108,1	1.638,7	41,1	622,7

FONTE: Ruuska (2013).

2.9.2. PAINÉIS COMPENSADOS

Compensados de madeira macia têm uma longa tradição como material de construção tanto para uso provisório como uso permanente nas obras. Compensado é usado como revestimento estrutural para piso, paredes e

coberturas, além de ser é usado como um componente em outros sistemas e produtos de madeira, tais como vigas “I” pré-fabricadas.

Um painel compensado é construído com um número ímpar de lâminas de madeira de várias espécies, montadas por colagem em camadas transversais. São produzidos com lâminas cortadas a partir de toras. Após a secagem das lâminas se aplica as resinas UF (ureia formaldeído) ou FF (fenol formaldeído) às folhas, essas são empilhadas em conjuntos, com a alternância de orientação das lâminas. As pilhas de laminas são colocadas em uma prensa a quente, onde a pressão e calor fornecem a aderência e a cura da resina. O painel curado é então removido e serrado (IWAKIRI, 2005). A Tabela 3 contém as informações de ACV sobre compensados fabricados em diversos locais do mundo.

TABELA 3 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA PAINÉIS COMPENSADOS

Painéis compensados		
a) Origem: EUA, amostras da região Pacífico noroeste dos EUA.		
Produto: <i>Softwood Plywood Production from the Pacific Northwest</i>		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Puettmann <i>et al.</i> (2013a)	Densidade básica: 0,47 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	242,7 gCO ₂ e por kg	114,10 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.800 gCO ₂ por kg	846,01 kgCO ₂ por m ³
b) Origem: Canadá		
Produto: <i>Canadian Softwood Plywood Sheathing</i>		
Limites da ACV: berço-ao-túmulo		
Fonte: Athena (2012b)	Densidade básica: 0,38 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	181,6 gCO ₂ e por kg	69,37 KgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	2.077 gCO ₂ por kg	785,80 kgCO ₂ por m ³
c) Origem: Canadá, e EUA		
Produto: <i>North American Softwood Plywood</i>		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Tam (2013)	Densidade básica: 0,49 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	264,2 gCO ₂ e por kg	129,77 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.994 gCO ₂ por kg	881,12 kgCO ₂ por m ³
d) Origem: Finlândia - <i>Standard Birch</i>		
Produto: Diversas indústrias Finlandesas		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Ruuska (2013)	Densidade básica: 0,66 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	718,0 gCO ₂ e por kg	473,9 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.188 gCO ₂ por kg	784,1 kgCO ₂ por m ³

2.9.3. PAINÉIS OSB (*ORIENTED STRAND BOARD*)

Uma placa ou painel de OSB (*Oriented Strand Board*) é um produto à base de madeira com estrutura de três camadas, feitas de partículas especiais longas e finas chamadas de “*strand*”. Na camada central as “*strands*” são orientadas a 90° em relação às camadas exteriores (PUETTMANN *et al.*, 2013b).

Para fabricação dos painéis OSB as toras descascadas são cortadas em “*strands*”. As “*strands*” são secas, misturadas com resina e cera, formando esteiras espessas, pouco compactas que são prensadas sob calor e pressão para formar os painéis. As toras são descascadas e cozidas em água quente antes do corte. As cascas e outros resíduos podem ser utilizados para produção de energia térmica ou seguir para aterros. Este processo usa mais de 25% das necessidades de energia elétrica de todo o processo de produção de painéis OSB (IWAKIRI, 2005).

As “*strands*” secas são então misturadas com adesivo e cera e enviadas para a formação da esteira. Uma vez que a esteira é formada, esta é prensada a quente, de 177 a 204 °C, formando um tapete por aquecimento que cura a resina em 3 a 5 minutos. Esta etapa consome a maior parte da energia térmica. A etapa final é somente de acabamento do painel OSB, que é cortado, lixado e embalado para o transporte. Esta última etapa consome a menor quantidade de energia, mas produz um fluxo de resíduos que podem ser utilizados para produção de energia térmica, vendidos como um coproduto ou depositados em aterros (PUETTMANN *et al.*, 2013b).

As placas são fabricadas com espessuras de 6 a 40 mm e a densidade das placas é de aproximadamente 600 kg por m³. As resinas utilizadas variam de resinas Fenol-Formaldeído (FF), mistura de resinas Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF) ou até resinas a base de Metil-Di-Isocianato (MDI) (IWAKIRI, 2005). A Figura 8 mostra a imagem de um painel OSB. A Tabela 4 contém as emissões e armazenamento de CO₂ para painéis OSB de diversas origens em umidade de equilíbrio com o ar.

FIGURA 8 - PAINEL OSB



TABELA 4 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA PAINÉIS DE OSB

Painéis OSB (<i>Oriented Strand Board</i>)		
a) Origem: Alemanha, Fritz Egger Holzwerkstoffe Wismar GmbH.		
Produto: EGGER EUROSTRAND® OSB boards for construction		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Bossenmayer (2012a)	Densidade básica: 0,615 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	203,2 kgCO ₂ e por kg	25,0 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.650 kgCO ₂ por kg	1.015 kgCO ₂ por m ³
b) Origem: EUA, amostras de diversos estados do Sudoeste dos EUA.		
Produto: Painéis OSB produzidos na região sudoeste dos EUA.		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte : Puettmann <i>et al.</i> (2013b)	Densidade básica: 0,60 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	483,3 kgCO ₂ e por kg	290,0 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.903 kgCO ₂ por kg	1.142 kgCO ₂ por m ³
c) Origem: Alemanha. Glunz AG – Nettgau Plant.		
Produto: Glunz AG – AGEPAN® OSB – Greenline OSB		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Bossenmayer (2012b)	Densidade básica: 0,62 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	417,0 kgCO ₂ e por kg	258,5 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.342 kgCO ₂ por kg	832,0 kgCO ₂ por m ³
d) Origem: Brasil, estudo laboratorial		
Produto: Paineis OSB produzido em laboratório		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Ferro <i>et al.</i> (2015)	Densidade básica: 0,7 g/cm ³	
Fator de emissão – FE:	951,1 kgCO ₂ e por kg	665,8 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	-	-

2.9.4. PAINÉIS MDF (*MEDIUM DENSITY FIBERBOARD*)

Produtos de MDF são utilizados na construção civil somente para uso em locais secos, na confecção de divisórias ou peças de acabamento como guarnições, molduras e rodapés.

São produzidas com fibras de madeira, água, resina UF (8 a 10% do peso das fibras) e cera de parafina (<1%). O processo de fabricação consiste no descascamento das toras, transformação em fibras no picador, peneiramento e secagem, desfibrilação e aplicação da resina, formação do colchão, pré-prensagem a frio, prensagem a quente, corte em painéis “master”, resfriamento, retirada das aparas, corte dos painéis no tamanho final, lixamento e embalagem. Todo o resíduo é reutilizado no processo de geração de calor (IWAKIRI, 2005). A Tabela 5 contém as emissões e armazenamento de CO₂ para painéis de MDF de diversas origens em umidade de equilíbrio com o ar.

TABELA 5 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA PAINÉIS DE MDF

Painéis MDF (<i>Medium Density Fiberboard</i>)		
a) Origem: Alemanha, Fritz EGGER GmbH & Co. OG		
Produto: EGGER <i>Raw Medium Density Fiberboard</i>		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Ruuska (2013)		Densidade básica: 0,730 g/cm ³
Fator de emissão – FE:	652,0 gCO ₂ e por kg	475,9 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.418 gCO ₂ por kg	1.035 gCO ₂ por m ³
b) Origem: EUA, amostras diversas dos EUA.		
Produto: U.S. Medium Density Fiberboard		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte : Puettmann <i>et al.</i> , 2013c		Densidade básica: 0,741 g/cm ³
Fator de emissão – FE:	759,9 gCO ₂ e por kg	563,1 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.841 gCO ₂ por kg	1.364 gCO ₂ por m ³
c) Origem: Suécia, Karlit AB.		
Produto: <i>Medium density fiber board</i> , Karlit AB.		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: Ruuska (2013)		Densidade básica média: 0,775 g/cm ³
Fator de emissão – FE:	340,0 gCO ₂ e por kg	263,5 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.466 gCO ₂ por kg	1.136 gCO ₂ por m ³
d) Origem: Brasil		
Produto: MDF produzido em uma indústria brasileira		
Limites da ACV: portão-a-portão da indústria		
Fonte: Piekarski (2013)		Densidade básica: 0,683 g/cm ³
Fator de emissão – FE:	291-373 gCO ₂ e por kg	199-255 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	-	-

2.9.5. PAINÉIS MDP (*MEDIUM DENSITY PARTICLE FIBERBOARD*)

Produto semelhante ao antigo aglomerado, os painéis de MDP podem ser utilizados na construção civil também em locais secos, em divisórias ou outros usos como painéis de fechamento.

São chapas produzidas com partículas de madeira aglutinadas por resinas sintéticas, reconstituídos em uma matriz randômica, que se consolidam pela a ação conjunta de calor e pressão, tendo como resultado uma chapa de grande resistência mecânica, plana e com superfície lisa (IWAKIRI, 2005; MALONEY, 1993). O MDP e o aglomerado convencional são semelhantes, se diferenciam pelo processo de fabricação. O aglomerado convencional é produzido em uma prensa cíclica, já o MDP tem sua fabricação em uma prensa contínua.

Os painéis MDP podem ser produzidos com resinas UF, que perdem resistência sob umidade, ou resinas FF, que proporcionam ao painel alta resistência à umidade, mas tem custo superior (RAZERA, 2006). Para aumentar a resistência ao fogo pode-se aplicar fosfato amônia, ácido bórico e bromato de amônia à massa do painel (IWAKIRI, 2005). Também se adiciona ao produto parafina (teor<1%), com a finalidade de reduzir a higroscopicidade e melhorar a estabilidade dimensional do painel (DIAS e LAHR, 2004).

Diferentemente dos outros painéis de madeira reconstituída, as partículas de madeira utilizada no MDP variam conforme a camada do produto. As do miolo são maiores, já as das superfícies são menores.

Na fabricação dos painéis é feita a encolagem das partículas com a resina, para logo a seguir formar o colchão pela deposição dessas em uma esteira móvel. Na sequência, o material vai à uma pré-prensagem a frio com a finalidade de reduzir a sua altura. A prensagem propriamente dita é a quente, a ação de temperatura e pressão cura o adesivo, densifica e consolida o colchão. A pressão utilizada é da ordem de 45 kgf/cm², o tempo de prensagem de 4 a 8 minutos, a temperatura é de cerca de 200 a 220°C. O percentual de umidade das partículas no início da produção deve ser de 11 a 13% nas camadas superficiais e do miolo de 3 a 5%. A umidade acelera a cura da resina, elevando a transferência de calor pelo fluxo de vapor. Após prensagem e corte na serra transversal o painel é resfriado em um virador giratório por 40 minutos.

Uma maturação final do produto por 24 a 72 horas permite a polimerização total da resina (IWAKIRI, 2005).

A Figura 9 mostra a imagem de um painel MDP onde estão bem salientes as diferentes camadas. A Tabela 6 contém os valores das emissões de CO₂e pela produção e de CO₂ armazenado por painéis de MDP produzidos na América do Norte e na Austrália.

FIGURA 9 - IMAGEM DE UM PAINEL MDP COM AS DIFERENÇAS ENTRE AS CAMADAS



Fonte: AMC and CWC (2013).

TABELA 6 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO POR PAINÉIS DE MDP

Painéis MDP (<i>Medium Density Particle Fiberboard</i>)		
a) Origem: Indústrias de painéis de partículas dos EUA e Canadá		
Produto: Painéis MDP produzidos nos EUA e Canadá		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: AMC and CWC (2013)	Densidade básica: 0,640 kg por m ³	
Fator de emissão – FE:	676,1 gCO ₂ e por kg	595,0 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.833 gCO ₂ por kg	1.174 kgCO ₂ por m ³
b) Origem: Forest and Wood Products Australia Ltd.		
Produto: <i>Particleboard UF 25 mm thick</i>		
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria		
Fonte: WOODSOLUTIONS (2015)	Densidade básica: 0,665 g por cm ³	
Fator de emissão – FE:	598,5 gCO ₂ e por kg	900 kgCO ₂ e por m ³
CO ₂ armazenado pelo produto	1.458 gCO ₂ por kg	1.210 kgCO ₂ por m ³

2.9.6. PISOS LAMINADOS MELAMÍNICOS EM HDF

Um piso laminado é composto por um miolo de HDF (*High Density Fiber*) e, em cada face, uma camada de papel revestida com resina melamínica. A face superior, ou camada superficial que fica exposta, tem um acabamento decorativo agradável e é resistente a riscos, umidade e produtos de limpeza. A

face inferior é a camada balanceadora, que tem a função de dar estabilidade dimensional e proteger o piso da umidade do contra-piso (NBR 14833-1, 2009). O núcleo é composto por 75 a 85% de fibras de madeira e 25 a 15% de resina, os revestimentos, sobre o total, representam 4% de papel e 4% de resina.

A composição do processo de fabricação conforme Bossenmayer, (2013a) está apresentada a seguir:

- Produção dos painéis brutos: Descascamento das toras, corte da madeira em partículas, cozimento das partículas, desfibramento no refinador, aplicação de resina sobre as fibras, secagem das fibras a cerca de ($h=9$ a 10%), formação do tapete de fibras misturadas com resina, pré-prensagem, prensagem a quente, refrigeração dos painéis, lixamento dos lados superior e inferior após a climatização;
- Produção dos papéis impregnados: Impregnação de resina (MUF) no papel, secagem do papel impregnado em secadores aquecidos, corte do papel no formato do painel e empilhamento em paletes;
- Laminação com papel: Colocação dos papéis impregnados para os lados superior e inferior do painel, prensagem dos papéis impregnados contra o painel, classificação por qualidade e empilhamento para climatização;
- Produção dos painéis de piso acabados: Corte dos painéis nas placas de piso com serra circular de com várias lâminas, corte dos encaixes laterais dos lados longos e curtos, aplicação da camada inferior de amortecer o som de impacto (se aplicável), revestimento dos chanfros se for o caso, controle de qualidade e acondicionamento em embalagens, por fim o e empilhamento para estoque;

Todos os resíduos gerados no curso de produção (corte, corte e moagem de resíduos) são usados para produção de energia térmica.

Existem dois tipos principais de pisos laminados de alta pressão: *high pressure laminate floor covering* (HPL) e *direct pressure laminate floor coverings* (DPL). O piso tipo DPL é o mais utilizado no mercado de pisos para uso doméstico e em escritórios. Em geral, há quatro camadas distintas de revestimento que são coladas ao mesmo tempo, durante a produção: a

camada de desgaste, o papel decorativo, o painel de HDF e, a camada de balanceamento na parte inferior. Pisos DPL tem custo mais baixo, porém um piso HPL é mais resistente e mais durável. Um piso HPL é produzido com folhas de papel *kraft* adicionais, tratadas com uma resina fenólica, que faz com que o papel fique rígido durante o processo de fabricação (BOSSENMAYER, 2013a).

O período de vida útil dos pisos, para aplicações residenciais é entre sete e 25 anos. Em aplicações comerciais, o período de utilização é geralmente de cinco anos. A Figura 10 mostra o esquema de montagem dos pisos laminados melamínicos de HPL e DPL. A Tabela 7 contém os valores das emissões de CO₂ e pela produção de pisos laminados na Europa e de CO₂ armazenado por estes

FIGURA 10 - ESQUEMA DOS PISOS LAMINADOS MELAMÍNICOS



FONTE: Larriba *et al.* (2014).

TABELA 7 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA PISOS LAMINADOS

Pisos laminados melamínicos em HDF	
a) Origem: Alemanha, Egger Retail Products GmbH & Co.	
Produto: EGGER laminate flooring	
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria	
Fonte: Bossenmayer (2013a)	Núcleo: HDF
Espessura: 7 mm – Classe AC1 a AC5	Massa por área: 6,79 kg por m ²
Fator de emissão – FE:	4,69 kgCO ₂ e por m ²
CO ₂ armazenado pelo produto:	9,30 kgCO ₂ por m ²
b) Origem: Alemanha, Egger Retail Products GmbH & Co.	
Produto: EGGER laminate flooring	
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria	
Fonte: Ruuska (2013)	Núcleo: HDF
Espessura: 6 mm	Massa por área: 5,40 kg por m ²
Fator de emissão – FE:	4,05 KgCO ₂ e por m ²
CO ₂ armazenado pelo produto:	7,97 kgCO ₂ por m ²
c) Origem: Europa, média de pisos PDL	
Produto: <i>Printed Décor Laminate Floor Covering</i> (PDL) – Ciclo de Vida 15 anos	
Limites da ACV: berço-ao-túmulo	
Fonte: Bossenmayer (2012c)	Núcleo: HDF
Espessura: 6 mm	Massa por área: 4,80 kg por m ²
Fator de emissão – FE:	2,50 kgCO ₂ e por m ²
CO ₂ armazenado pelo produto:	5,49 kgCO ₂ por m ²
d) Origem: Europa, média de pisos PDL	
Produto: <i>Printed Décor Laminate Floor Covering</i> (PDL) – Ciclo de Vida 15 anos	
Limites da ACV: berço-ao-túmulo	
Fonte: Bossenmayer (2012c)	Núcleo: HDF
Espessura: 12 mm	Massa por área: 14,40 kg por m ²
Fator de emissão – FE:	5,7 kgCO ₂ e por m ²
CO ₂ armazenado pelo produto:	10,3 kgCO ₂ por m ²
e) Origem: Europa, média de pisos HPL	
Produto: <i>Average High Pressure Laminate</i> (HPL Floor Covering) – Ciclo de Vida 15 anos	
Limites da ACV: berço-ao-túmulo	
Fonte: Bossenmayer (2012d)	Núcleo: HDF
Espessura: 6 mm	Massa por área: 4,80 kg por m ²
Fator de emissão – FE:	0,91 kgCO ₂ e por m ²
CO ₂ armazenado pelo produto:	5,10 kgCO ₂ por m ²
f) Origem: Europa, média de pisos HPL	
Produto: <i>Average High Pressure Laminate</i> (HPL Floor Covering) – Ciclo de Vida 15 anos	
Limites da ACV: berço-ao-túmulo	
Fonte: Bossenmayer (2012d)	Núcleo: HDF
Espessura: 12 mm	Massa por área: 14,40 kg por m ²
Fator de emissão – FE:	4,36 kgCO ₂ e por m ²
CO ₂ armazenado pelo produto:	10,10 kgCO ₂ por m ²

2.9.7. PISOS DE MADEIRA MACIÇA

A madeira é a única matéria-prima em um piso de madeira maciça. Um ciclo de produção florestal significa que a floresta tem que ser plantada, crescer, sofrer manutenção, ser colhida, o solo ser novamente cultivado e as árvores replantadas. Após o corte, as toras são transportadas para a indústria de processamento da madeira.

A fabricação do piso é iniciada com a entrada de madeira serrada (verde ou seca), que é aplainada, cortada nos tamanhos das pranchas, corte dos encaixes (laterais e finais) e embalagem. A consideração aqui é para pisos de madeira sem revestimento superficial. A Tabela 8 contém as emissões de CO₂e pela produção de pisos de madeira maciça e o CO₂ armazenado por estes.

TABELA 8 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PARA PISOS DE MADEIRA MACIÇA

Pisos de madeira maciça	
a) Origem: EUA – Leste, média de pisos de madeira maciça	
Fonte: Hubbart e Bowe (2008)	
Espessura: 1½"	Massa: 25,03 kg por m ²
Emissão durante atividades florestais:	20,04 kgCO ₂ e por m ²
Emissão durante a produção industrial:	0,22 kgCO ₂ e por m ²
Armazenado pelo produto:	42,65 kgCO ₂ por m ²
Espessura: 2¼"	Massa: 37,55 kg por m ²
Emissão durante atividades florestais:	30,06 kgCO ₂ e por m ²
Emissão durante a produção industrial:	0,33 kgCO ₂ e por m ²
Armazenado pelo produto:	63,97 kgCO ₂ por m ²
b) Origem: Alemanha, pisos de madeira sólida	
Limites da ACV: berço-ao-portão de saída da indústria	
Fonte: Rüter e Diederichs (2012)	
Espessura: aprox. 20 mm	Massa: 11,7 kg por m ²
Emissões durante a produção:	34,45 kgCO ₂ e por m ²
Armazenado pelo produto:	19,86 kgCO ₂ por m ²

2.10. OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO “NÃO DE MADEIRA”

Dentro desse item, passa-se a tratar os materiais que não tem madeira ou celulose em quantidades predominantes, como materiais “não de madeira”.

Como já foi mencionado anteriormente neste trabalho, a produção dos mais importantes e mais usuais materiais utilizados pela construção civil no Brasil é causadora de grandes emissões de GEE, em especial do CO₂, como principais exemplos têm-se o cimento Portland, a cal, o aço e os materiais cerâmicos (MEHTA, 2001; SANDBERG *et al.*, 2001; BRIBÁN e CAPILLA, 2011).

Alguns materiais de construção, assim como os HWP, também fixam ou absorvem carbono em suas estruturas, mas em geral em quantidades unitárias muito menores que a madeira. Normalmente estes materiais também emitem para sua fabricação, mais CO₂e que o CO₂ armazenado, como são os produtos constituídos de polímeros e a cal. A cal em especial é um caso relevante, que mais adiante será tratado, por absorver quantidades significativas de CO₂ durante o seu endurecimento.

A seguir, da mesma forma que para os HWP, estão colocadas informações relevantes para este estudo, principalmente as emissões de CO₂, sobre os materiais de construção “não-de-madeira” mais usuais nas obras de edifícios no Brasil. Novamente as informações colocadas são derivadas de ACV e EPD, consistindo em uma descrição rápida do processo de produção, alguns diagramas dos limites dos sistemas utilizados, e principalmente as emissões de CO₂e pela produção e eventualmente a quantidade de CO₂ armazenada em cada produto.

Alguns FE apresentados estão colocados em unidades mais adequadas para o uso na construção civil, de acordo como é controlado o seu consumo. Painéis por exemplo, tem seus FE colocados por área (m²), concretos e argamassas por volumes (m³).

2.10.1. O CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland, aglomerante amplamente utilizado na construção civil, é produzido com uma mistura de pedra calcária e argila, de forma que se proporcione os quatro ingredientes essenciais necessários: cal, sílica, alumina e ferro. Ao misturar esses ingredientes e expondo-os a calor intenso, as reações químicas resultantes convertem, por fusão parcial, essas matérias-

primas em pelotas chamadas de clínquer. Após adição de gesso (3 a 7%), a mistura é moída para formar o cimento tipo CP-I pela NBR 5732:1991.

Para reduzir o consumo de energia, e as emissões de CO₂, pela indústria cimenteira são adicionados a este CP-I, resíduos de produtos com propriedades semelhantes ao clínquer, tais como cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, material carbonático ou pozolana natural (ABCP, 2002). As escórias de alto-forno são resíduos da produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas. Os materiais pozolânicos usuais no Brasil podem ser resíduos da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas ou certos tipos de argilas calcinadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C). Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição (ABCP, 2002). A Tabela 9 contém os limites das composições dos cimentos Portland brasileiros, conforme diversas normas técnicas da ABNT.

TABELA 9 - COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR
	CP I-S	99 a 95		1 a 5		5732:1991
	CP II-E	94 a 56	6 a 34	-	0 a 10	
Composto	CP II-Z	94 a 76	-	6 a 14	0 a 10	NBR
	CP II-F	94 a 90	-	-	0 a 10	11578:1997
Alto-Forno	CP III	65 a 25	35 a 70	-	0 a 5	NBR 5735:1991
Pozolânico	CP IV	85 a 45	-	15 a 50	0 a 5	NBR 5736:1991
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100 a 95	-	-	0 a 5	NBR 5733:1991

FONTE: ABCP (2002).

O documento CO₂ *Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry* (WBCSD, 2005), a partir do desempenho médio de 170 indústrias recomenda considerar a média de 0,862 kgCO₂ por kg de clínquer como FE padrão. Moya, Pardo e Mercier (2010), tratando o cimento Portland produzido na Europa de forma geral, considera como FE, com base em uma fábrica de cimento com tecnologia moderna, da ordem de 0,65 a 0,92 kgCO₂ por kg de cimento, produzindo uma média mundial de aproximadamente 0,83 kgCO₂e

por kg de cimento. Uma ACV do “berço-ao-portão da indústria” desenvolvida por Feiza *et al.* (2009) para indústrias na Alemanha chegou ao FE de 0,850 kg CO₂e por kg de cimento.

Especificamente aos tipos de cimento nacionais já existem resultados de ACV de um grande fabricante nacional (CP II E 40, CP III-40 RS e CP V-ARI), publicados em QUANTIS (2016). Igualmente disponíveis está a ACV publicada em CBCS (2014), que mostra os resultados de emissões para vários cimentos nacionais (CP II-Z, CP II-E, CP III, CP IV e CP V), que foram calculados a partir dos valores médios de consumo energético para a produção de uma tonelada de clínquer entre 2008 e 2012, publicados pelo WBCSD (www.wbcscement.org/GNR-2012/Brazil/GNR-Indicator_329-Brazil.html) e os teores de clínquer permitidos pelas normas brasileiras. Todos os valores dos FE citados, inclusive as médias dos valores da ACV do CBCS (2014) estão apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 - EMISSÕES POR TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND

Estudos Internacionais		
Fonte: WBCSD (2011)	FE de clínquer (kgCO ₂ e por kg)	
Média de 170 indústrias	0,862	
Fonte: Moya, Pardo e Mercier (2010)	FE de cimento (kgCO ₂ e por kg)	
Cimentos europeus	0,650 - 0,920 média: 0,785	
Média mundial	0,830 kgCO ₂ e	
Fonte: Feiza <i>et al.</i> (2009)	FE de cimento (kgCO ₂ e por kg)	
Cimentos alemães	0,850 kgCO ₂ e	
Estudos para os cimentos Brasileiros		
Fonte: Quantis (2016)	FE de cimento (kgCO ₂ e por kg)	
CP II E 40	0,787	
CP III-40 RS	0,413	
CP V-ARI	0,917	
Fonte: CBCS (2014)	Limites	Médias
CP II-F	716,4 - 804,4	0,760
CP II-Z	599,8 - 804,4	0,702
CP II-E	433,2 - 804,4	0,618
CP III	174,9 - 545,2	0,360
CP IV	344,3 - 723,9	0,534
CP V	758,0 - 858,0	0,808

2.10.2. O AÇO

O aço é uma liga de ferro e carbono, sendo este último elemento químico está presente em percentuais de 0,08% a 1,67%. Minérios de ferro são

encontrados por toda crosta terrestre, onde o elemento químico ferro é encontrado em moléculas junto com os elementos químicos oxigênio e sílica formando óxidos. Para a obtenção do aço a partir do minério usa-se carvão mineral, que exerce dupla função. Serve como combustível para se alcançar as altas temperaturas necessárias à fusão (da ordem de 1.500°C) e como redutor, associando-se ao oxigênio que é retirado do minério sob a alta temperatura. Estes processos ocorrem dentro do alto-forno siderúrgico. Dentro do alto-forno são colocados o minério de ferro, coque de carvão mineral e cástinas, que são argilas calcárias que atuam como fundentes e elevam o pH, o resultado desta etapa é o ferro-gusa. A combustão do coque produz CO e CO₂. A descarbonatação das cástinas também emite CO₂. Ao final, o ferro-gusa terá uma composição aproximada de 96% Fe e 4% de C. O processo seguinte, que transforma o ferro-gusa em aço ocorre na aciaria no conversor, no qual o oxigênio sob pressão é injetado dentro do ferro-gusa líquido para se combinar com o carbono e reduzir a quantidade desse elemento químico na liga metálica e, portanto, nesta etapa mais CO e CO₂ são gerados. De acordo com o *International Iron and Steel Institute*, a quantidade de CO₂ emitida por tonelada de aço, pela produção de aço a partir de minério, pode variar de acordo com a utilização de cástinas alto forno (SANDBERG *et al.*, 2001).

Outra maneira que a indústria siderúrgica tem para produzir aço é por meio da reciclagem de sucata, na qual, na realidade, não ocorre uma produção e sim uma transformação da sucata de aço em produtos novos. Cabe salientar que não há perda de qualidade com a reciclagem de metais. A fundição de sucata acontece em fornos elétricos, nos quais a energia elétrica é aplicada à sucata por meio de eletrodos consumíveis de grafite, de onde vêm emissões de CO₂. Somente o consumo do grafite gera uma média de 600 kg de CO₂ por tonelada de aço reciclado (SANDBERG *et al.*, 2001). Algumas siderúrgicas adicionam sucata de aço, como forração, diretamente no conversor, misturando com o ferro gusa.

Na Tabela 11 estão as emissões da ACV publicada em *World Steel Association* (WSA, 2011), para produtos siderúrgicos em conformidade com as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, incluindo quinze produtos, de 49 usinas de quinze empresas diferentes (24 altos-fornos e 12 fornos elétricos a

arco), representando mais de 25% da produção mundial de aço bruto. Os quinze produtos incluídos no estudo são os principais produtos acabados da indústria de aço, como chapas, bobinas laminadas a quente, bobinas laminadas a quente decapadas, bobinas laminadas a frio, acabamento de bobinas laminadas a frio, aço galvanizado a quente por imersão, aço eletro-galvanizado, aço pintado, aço cromado via eletrolítica, tubo de U e O, tubos soldados, barras retas, vergalhões e fio-máquina. Este estudo calculou os valores para um sistema do “berço-ao-portão da indústria” e inclui separados os benefícios da reciclagem.

TABELA 11 - EMISSÕES DE PRODUTOS SIDERÚRGICOS

Produtos siderúrgicos:	ACV	FE kgCO ₂ e por kg
Barras retas	“berço-ao-portão da indústria”	1,6
	Incluída a reciclagem	1,2
	Benefício da reciclagem	-0,4
Bobinas laminadas a quente	“berço-ao-portão da indústria”	2,0
	Incluída a reciclagem	0,9
	Benefício da reciclagem	-1,1
Aço galvanizado a quente por imersão	“berço-ao-portão da indústria”	2,5
	Incluída a reciclagem	1,3
	Benefício da reciclagem	-1,2

FONTE: WSA (2011).

Outro estudo internacional sobre as emissões da indústria siderúrgica é o trabalho de Sandberg *et al.* (2001), que se refere aos dados da *World Wide LCI database for steel industry product* de 1999. O estudo apresentou valores de média mundial de FE para a produção de bobinas laminadas a quente e chapas de 1,97 kgCO₂e por kg de aço. O mesmo estudo analisou 35 siderúrgicas com alto-forno que produzem bobinas laminadas a quente e chapas, além de quatro siderúrgicas com forno a arco elétrico que produzem barras retas. Os valores das emissões calculados estão apresentados na Tabela 12.

Especificamente para barras de armaduras de concreto, uma EPD, desenvolvida por uma siderúrgica do sul dos EUA, que tem como matéria-prima 97% de sucata (forno a arco elétrico), calculou FE do “berço-ao-portão

da indústria” em 0,850 kgCO₂e por kg de aço, (CMC, 2015). Outra EPD de uma siderúrgica em Mo i Rana, Noruega, que tem como matéria-prima 100% de sucata (forno a arco elétrico), calculou FE do “berço-ao-portão da indústria” em 0,360 kgCO₂e por kg de aço, (ALMEMARK, 2015). Mais uma EPD, agora de uma siderúrgica da Turquia, que tem como matéria-prima 100% de sucata (forno a arco elétrico), calculou FE do “berço-ao-portão da indústria” em 0,802 kgCO₂e por kg de aço (PE INTERNATIONAL, 2013).

TABELA 12 - EMISSÕES DE PRODUTOS SIDERURGICOS DA *WORLD WIDE LCI DATABASE FOR STEEL INDUSTRY PRODUCT DE 1999*

Produtos siderúrgicos:	Estudo:	FE kgCO ₂ e por kg
Bobinas laminadas a quente e chapas	Média mundial da siderurgia (Alto-forno e forno a arco elétrico)	1,97
Bobinas laminadas a quente e chapas	Média de: 35 siderúrgicas com alto-forno	1,60 a 2,60
Barras retas	Média de: 4 siderúrgicas com forno a arco elétrico	0,35 a 0,80

FONTE: Sandberg *et al.* (2001).

2.10.3. A CAL

A cal é outro produto que possui ampla aplicação na construção civil (MCT, 2010). A maior parte da cal produzida no Brasil é obtida de calcários dolomíticos cujo composto químico principal é o carbonato de cálcio (CaCO₃).

O produto da calcinação do calcário em temperaturas de 700 a 1.000°C é a cal virgem, também conhecida por cal viva, a qual é composta predominantemente por óxido de cálcio (CaO). A calcinação é da ordem de 700°C para as rochas dolomíticas e de 900°C a 1000°C para as rochas calcíticas. A partir da cal virgem se obtém a cal hidratada, por meio da sua combinação com a água (CETESB, 2011).

A cal pode ser aplicada na construção civil de duas formas, cal virgem (CV, que é composta predominantemente por CaO), ou cal hidratada (CH, que é predominantemente composta por Ca(OH)₂). O produto que efetivamente é utilizado nas obras é a cal hidratada. O processo de hidratação da cal virgem pode ser feito na obra (quando se utiliza a CV), ou no ambiente industrial

(quando a obra adquire já a CH), de qualquer forma, a operação de hidratação emite GEE em quantidades mínimas (JOHN, PUNHAGUI E CINCOTTO, 2014). A proporção de produção é de aproximadamente 1,75 toneladas de rocha calcária para uma tonelada de cal virgem e com uma tonelada de cal virgem para 1,3 toneladas de cal hidratada (SILVA, 2009).

Os FE da cal virgem dependem da temperatura da calcinação e tempo no forno, das impurezas presentes na matéria-prima e da granulometria do calcário. As emissões de CO_2 são originárias da descarbonatação do calcário e da queima de combustíveis.

Somente considerando a descarbonatação, o trabalho de John, Punhagui e Cincotto (2014) apresentou cálculos para FE para a cal, baseando-se na relação estequiométrica e nos limites máximos de calcário da NBR 6453:2003 e da NBR 7175:2003 (limites de CO_2 , impurezas e óxidos não hidratados). O trabalho também partiu do pressuposto que 100% do calcário é constituído de carbonato de cálcio (CaCO_3) ou dolomito (Ca.Mg.2CO_3), e que o CO_2 residual é combinado como carbonato de cálcio, e que a fração não hidratada será preferencialmente de MgO . Com essas considerações calculou-se que os FE, que para a cal virgem variariam de 464 a 868 kgCO_2 e por tonelada de cal, e da cal hidratada de 419 a 694 kgCO_2 e por tonelada de cal.

O tipo e quantidade consumida de combustível e a eficiência do forno interferem diretamente nas emissões de CO_2 . As emissões dos fornos de calcinação de cal no Brasil foram analisadas em John, Punhagui e Cincotto (2014), onde se concluiu que variam de 188 a 565 kgCO_2 e por tonelada de cal virgem. Portanto as emissões de CO_2 pela descarbonatação do calcário são inerentes à produção da cal, e constantes em relação à matéria-prima, e as variações nas emissões são decorrentes do desempenho dos fornos e no tipo de combustível empregado (JOHN, PUNHAGUI E CINCOTTO, 2014).

É muito comum, especialmente no Paraná o uso de lenha ou resíduos de madeira de florestas plantadas, fator que mitiga as emissões, mas há o problema do uso de madeira nativa de fonte ilegal, lembrando que emissões de CO_2 decorrentes da queima de biomassa originária de silvicultura sustentável não são consideradas emissões de GEE (KUITTINNEN, LUDVIG e WEISS, 2013 e USEPA, 2003).

Na Tabela 13 estão os valores de emissão de CO₂ considerados para cal no levantamento de John, Punhagui e Cincotto (2014). É importante ressaltar que este trabalho não é uma ACV, é somente um levantamento das emissões para a produção de cal. Nessa tabela estão os valores das emissões de CO₂ para a produção de cal, com resultados separados para a descarbonatação de tipos diferentes de calcário e causados pela queima de combustíveis em diferentes tipos de fornos.

Costa (2012), em um levantamento de emissões para materiais de construção analisou o setor da cal, considerando as etapas do “berço-ao-consumidor”, para uma média do setor de indústrias próximas a cidade do Rio de Janeiro, analisando empresas que utilizam como combustível lenha, óleo combustível e gás, cujos resultados chegaram aos FE da Tabela 14.

TABELA 13 - EMISSÕES PARA A CAL

Emissões levantadas para as etapas de produção da cal hidratada	FE kgCO ₂ e por kg de cal hidratada	
	Min.	Max.
Descarbonatação (cálculo estequiométrico)		
Cal Hidratada (geral)	0,419	0,694
Cal Hidratada (calcítica)	0,419	0,614
Cal Hidratada (dolomítica)	0,429	0,694
Calcinação (queima de combustível nos fornos)		
Forno em geral	0,188	1,475
Forno Artesanal ou de alvenaria	0,479	1,475
Forno Vertical de Fluxo Paralelo regenerativo	0,188	0,337
Forno Vertical de Cuba Simples	0,399	0,624
Forno Horizontal Rotativo	0,564	0,565

FONTE: John, Punhagui e Cincotto (2014).

TABELA 14 - EMISSÕES PARA A CAL POR ETAPAS

Emissões para a cal hidratada	FE (kgCO₂e por kg)
Emissões das reações químicas	0,753
Emissões do uso de energia	0,330
Emissões do transporte (1.600 km)	0,101
Fator de emissão do setor de cal virgem	1,184
Fator de emissão do setor de cal hidratada	0,911

FONTE: Costa (2012).

Como aproximadamente 60% das emissões de CO₂ são relativas a operação de descarbonatação do calcário, a cal hidratada quando aplicada na obra, tem o potencial de absorver novamente o CO₂ liberado nesta etapa. A maior parte desta absorção ocorre em um ano, mas o processo de carbonatação não se completa efetivamente, devido à formação de cristais de calcita dentro dos poros da argamassa, fator que impede a difusão do CO₂ (CIZER *et al.*, 2008).

Portanto, devido ao fato do aglomerante cal ser muito usual nos processos de construção civil brasileira, a contabilização desse carbono armazenado, da mesma forma que para os produtos da madeira, é relevante para se calcular os totais das emissões das obras.

2.10.4. OS MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos podem ser divididos em grupos de produtos, os de cerâmica vermelha, como tijolos, telhas e os produtos de cerâmica clara, como revestimentos (pisos e azulejos) e louça sanitária. Os processos de produção de cada grupo são significativamente diferentes. As emissões relacionadas à produção são principalmente resultado da queima de combustível para a secagem e queima dos produtos e da calcinação dos carbonatos presentes na matéria-prima.

A cerâmica vermelha compreende aos produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após a queima se obtém materiais porosos de coloração avermelhada como blocos (tijolos) e telhas (MINEROPAR, 2000).

Após a extração da matéria-prima e transporte até a indústria, segue-se a limpeza e homogeneização da massa (moagem, mistura dos diferentes tipos de argilas e adição de água) e a moldagem das peças. Após este processo é realizado o corte das peças e essas são postas para secagem, que pode ser realizada de forma natural ou artificial. Na sequência vem a queima, que pode ser realizada em fornos contínuos ou intermitentes, sob temperaturas de 750 a 1000°C que utilizam lenha, resíduos de madeira ou óleo Diesel (MINEROPAR, 1997; SOARES e PEREIRA, 2004).

Soares e Pereira (2004) desenvolveram um estudo para ACV parcial, para blocos cerâmicos, considerando somente a extração da argila e as etapas de produção dentro da fábrica, para duas empresas de Santa Catarina com padrões tecnológicos diferentes, utilizando óleo Diesel como combustível.

Barbosa *et al.* (2012), para blocos cerâmicos, desenvolveram uma ACV do “berço-ao-portão do consumidor”, utilizando o banco de dados do *software* SimaPro 7.3 (*System for Integrated Environmental Assessment of Products*). Costa (2012) em um levantamento de emissões para materiais de construção analisou o setor de cerâmica vermelha (blocos e telhas), considerando uma distância de transporte de 325 km. Os resultados dos FE obtidos por ambos os trabalhos estão na Tabela 15.

TABELA 15 - EMISSÕES PARA CERÂMICAS VERMELHAS

Tijolos ou Blocos Cerâmicos		
Tijolos ou blocos vazados	FE	
	kgCO ₂ e por kg	kgCO ₂ e por m ²
Fonte: Soares e Pereira (2004) - Levantamento para extração e produção		
Empresa A		
(35,76 blocos por m ² ou 93,69 kg por m ²)	0,447	41,880
Empresa B		
(32,18 blocos por m ² ou 97,67 kg por m ²)	0,219	21,410
Média	0,333	31,645
Fonte: Costa (2012) - Levantamento “berço-ao-consumidor”		
Produção (“portão-a-portão”)	0,0910	-
Transporte - 325 km	0,0200	-
Total	0,1110	-
Fonte: Barbosa <i>et al.</i> (2012) - ACV do “berço-ao-portão do consumidor”		
Produção (“portão-a-portão”)	0,0442	-
Transporte – 2.250 km	0,5777	-
Total	0,6219	-
Fonte: Almeida <i>et al.</i> (2011) – EPD do “berço-ao-portão da indústria”		
Tijolos cerâmicos de 15 fabricantes portugueses		
Total	0,141	-

2.10.5. OS AGREGADOS

A produção dos agregados emite CO₂ durante as fases de extração, do transporte, das operações dentro da central de britagem (ou central de beneficiamento), com a operação do britador, peneiras vibratórias e esteiras. Os britadores trituram as rochas até as granulometrias desejadas e as peneiras

fazem à classificação. Utiliza-se óleo Diesel nas máquinas de extração, nos caminhões de transporte em alguns equipamentos da central de britagem ou beneficiamento de areia natural. Estes equipamentos das centrais também utilizam energia elétrica (MEHTA e MONTEIRO, 2006; COSTA, 2012).

Os agregados são classificados pelo tamanho em miúdo e graúdo. O agregado miúdo é definido como areia de origem natural ou artificial, (resultante da britagem de rochas), cujos grãos são passantes na peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. O agregado graúdo normalmente é a brita, cujos grãos ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm (NBR 7211: 2009).

2.10.5.1. AGREGADOS GRAÚDOS

Agregado artificial graúdo tem amplo uso na indústria da construção civil, em especial na confecção de concretos, bases para pavimentação e drenos. A produção de brita, ou agregado graúdo proveniente da britagem de rocha se inicia na extração da jazida, feita com o auxílio de explosivos, após o que a rocha retirada e transportada até a central de britagem, onde é triturado, e na sequência o produto é classificado por tamanho em peneiras vibratórias. Outro tipo de agregado graúdo é o pedregulho, ou agregado graúdo natural, proveniente da separação da areia natural. A produção se inicia na lavra, de onde é feita a extração, no passo seguinte o material é transportado para a central de beneficiamento, onde se procedem a lavagem, o peneiramento e a classificação. Na extração se usa equipamentos a Diesel, na central de britagem e de beneficiamento, se utiliza principalmente equipamentos mecânicos a eletricidade, mas também a Diesel (MEHTA e MONTEIRO, 2006; COSTA, 2012).

Ruuska (2013) na publicação *Carbon Footprint for building products*, apresenta o cálculo das emissões para a obtenção de brita e pedregulho natural na Europa, baseado e uma ACV do “berço-ao-portão da indústria”, incluídos os explosivos necessários à extração do material britado. Os resultados dos FE estão apresentados na Tabela 16.

Costa (2012), em seu trabalho, calculou separadamente as emissões da extração, do processamento e do transporte (112 km) de pedra britada. Para as britas foram consideradas também as emissões dos energéticos necessários

para extração. Os resultados dos FE obtidos também estão apresentados na Tabela 16 em kgCO₂e por kg de brita e, utilizando uma massa unitária de 1.400 kg por m³, os FE em KgCO₂e por m³ de brita.

TABELA 16 - EMISSÕES PARA AGREGADO GRAÚDO

Agregado graúdo		
ACV do “berço-ao-portão da indústria”		
Fonte: Ruuska (2013)	FE	
Produto	kgCO ₂ e por kg	KgCO ₂ e por m ³
Pedra britada - 16/32 mm – Europa	0,1370	0,1918
Pedregulhos naturais 2/32 mm – Europa	0,0033	0,0056
Levantamento de emissões		
Fonte: Costa (2012)	FE	
Produto: agregado graúdo de pedra britada	kgCO ₂ e por kg	KgCO ₂ e por m ³
Extração – Diesel	0,0717	0,1004
Processamento – Eletricidade	0,0005	0,0007
Transporte 112,5 km	0,0140	0,0196
Total para agregado graúdo de pedra britada	0,0858	0,1207

2.10.5.2. AGREGADOS MIÚDOS

Agregado miúdo tem amplo uso na indústria da construção civil, em especial na confecção de concretos, argamassas, bases para pavimentação e drenos. A produção de areia natural se inicia na lavra, de onde é extraída e transportada para a central de beneficiamento, onde se procedem a lavagem, o peneiramento e classificação. A produção de areia artificial, ou areia de pedra é através da britagem de rocha, da mesma forma que as britas, só que se tritura até dimensões menores. Para a extração da rocha ou dos pedregulhos se usa equipamentos a Diesel. Na central de britagem e de beneficiamento, se utiliza principalmente equipamentos mecânicos a eletricidade, mas também alguns a Diesel (MEHTA e MONTEIRO, 2006; COSTA, 2012).

Ruuska (2013), na publicação *Carbon Footprint for building products*, apresenta o cálculo das emissões para a obtenção de areia natural na Europa, baseado em uma ACV do “berço-ao-portão da indústria”. Os FE estão apresentados na Tabela 17.

Costa (2012), em seu trabalho calculou separadamente as emissões da extração, do processamento e do transporte (112 km) de areia de pedra britada. Para o material britado foram consideradas também as emissões dos energéticos necessários para extração. Os FE obtidos estão apresentados na também na Tabela 17 em kgCO₂e por kg de brita e calculado, para uma massa unitária de 1.400 kg por m³, as emissões em KgCO₂e por m³ de areia.

TABELA 17 - EMISSÕES PARA AGREGADO MIÚDO

Agregado miúdo		
ACV do “berço-ao-portão da indústria”		
Fonte: Ruuska (2013)	FE	
Produto	kgCO ₂ e por kg	KgCO ₂ e por m ³
Areia natural – 0/2 mm – Europa	0,0024	0,0036
Levantamento de emissões		
Fonte: Costa (2012)	FE	
Produto: agregado miúdo de pedra britada	kgCO ₂ e por kg	KgCO ₂ e por m ³
Extração – Diesel	0,0717	0,1004
Processamento – Eletricidade	0,0002	0,0003
Transporte 112,5 km	0,0140	0,0196
Total para agregado miúdo de pedra britada	0,0858	0,1203

2.11. O CONCRETO

O presente estudo trata das emissões de GEE decorrentes da produção de concreto produzido ou dosado em central, cuja produção envolve a recepção e armazenamento das matérias-primas e a mistura em caminhões betoneira. São consideradas as emissões provenientes da produção dos agregados e do cimento Portland, do consumo de energia, assim como as emissões da mistura. Para o concreto usinado, há a peculiaridade do fato que o caminhão betoneira no trajeto de transporte até a obra simultaneamente procede o transporte e a mistura do concreto.

O concreto é um composto de cimento Portland, agregados e água, sendo o material mais largamente usado em construção. Para muitas aplicações, oferece propriedades adequadas a um baixo custo, combinado com os benefícios ecológicos e de economia de energia. Além dos componentes tradicionais, atualmente no concreto se faz uso cada vez mais intensivo de aditivos que melhoram suas propriedades e reduzem seu custo. Aditivos que

minimizam o consumo de cimento, aditivos que melhoram a durabilidade dos concretos e aditivos que possibilitam a obtenção de concretos com resistências cada vez maiores têm impactos ambientais favoráveis sobre esse tipo de material (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A maior parte das emissões de CO₂ causadas pelo concreto é proveniente do cimento (LIMA, 2010). Portanto, aditivos que minimizem os consumos de cimentos nos concretos, como a utilização de concretos com resistências mais altas, permitindo assim reduções de consumo do próprio concreto nas estruturas, tem grande potencial como ferramentas para redução de emissões de CO₂ pelas obras (FREITAS, 2013).

O *Athena Sustainable Materials Institute* de Ottawa, Canadá, em 2005, desenvolveu diversas ACV do “berço-ao-portão da indústria” para os cimentos e concretos de seis regiões canadenses. Foram estudados três tipos de concretos, cujas dosagens e consumos de materiais estão apresentados na Tabela 18. As emissões para os correspondentes concretos estão apresentados na Tabela 19.

TABELA 18 - DOSAGENS DOS CONCRETOS ACV Athena (2005)

Dosagens dos concretos			
Matérias-primas (kg por m³)	Concreto		
	20 MPa	30 MPa	60 MPa
Cimento	204	297	352
Cinzas volantes	36	53	-
Sílica-ativa	-	-	33
Agregado graúdo	1009	1092	1088
Agregado miúdo	925	722	748
Água	160	160	165
Total	2334	2324	2386

FONTE: Athena (2005).

Costa (2012) em seu trabalho estimou as emissões relativas à produção de diversos concretos considerando a soma das emissões totais geradas pelos processos de extração, processamento e transporte das matérias-primas (cimento e agregados) e do produto acabado. Os resultados dos FE para concretos com resistências de 15 a 50 MPa estão apresentados na Tabela 20, usando cimento CP II-E 32 e Tabela 21 usando cimento CP II-F 32.

TABELA 19 - EMISSÕES DOS CONCRETOS Athena (2005)

Processos:	FE dos concretos		
	20 MPa	30 MPa	60 MPa
	kgCO ₂ e por m ³		
Matéria-prima - Extração e processamento	3,69	3,46	3,50
Matéria-prima – Transporte	5,06	4,54	12,41
Processamento do concreto	15,41	15,34	15,75
Produção de cimento	185,76	271,83	271,83
Total:	209,93	295,18	303,50

FONTE: Athena (2005).

TABELA 20 - CONCRETOS COM CP II-E 32 – Costa (2012)

Concreto	Consumos em kg por m³					FE kgCO ₂ e por m ³
	Aditivo	Água	Cimento	Brita	Areia	
15 MPa	3,6	203	239	874	919	329
20 MPa	4	196	269	981	912	358
25 MPa	4,4	190	292	904	906	366
30 MPa	4,8	184	317	920	903	383
35 MPa	5,2	186	344	932	891	401
40 MPa	5,5	186	365	942	883	415
45 MPa	5,8	186	387	949	870	429
50 MPa	6,2	185	412	957	856	445

FONTE: Costa (2012)

Na dissertação (SJUNNESSON, 2005) a autora fez um estudo de ACV do “berço-ao-túmulo” para dois tipos de concreto com foco sobre o uso de aditivos superplastificantes. Os resultados mostram que a produção da matéria-prima e os transportes envolvidos no ciclo de vida são os principais contribuintes para a carga ambiental. A matéria-prima que tem o maior impacto é o cimento. As fases do ciclo de vida incluídas foram a produção das matérias-primas, a produção de concreto e as operações de transporte. As dosagens dos materiais utilizadas por estes estudos estão na Tabela 22, as distâncias de transporte consideradas na Tabela 23 e os FE para os dois tipos diferentes de concretos na Tabela 24.

TABELA 21- CONCRETOS COM CP II-F 32 – Costa (2012)

Concreto	Consumos em kg por m³					FE kgCO ₂ e por m ³
	Aditivo	Água	Cimento	Brita	Areia	
15 MPa	4,1	195	271	873	889	347
20 MPa	4,6	192	305	891	878	370
25 MPa	4,9	188	329	805	871	377
30 MPa	5,4	191	361	916	853	407
35 MPa	5,8	189	386	929	846	424
40 MPa	6,3	193	419	937	823	445
45 MPa	7,0	200	464	942	784	471
50 MPa	7,7	205	513	949	744	501

FONTE: Costa (2012)

TABELA 22 - DOSAGENS PARA CONCRETOS DE Sjunnesson (2005)

Consumos para concretos		
Materiais para concretos de	20 a 25 MPa (kg por m ³)	35 a 45 MPa (kg por m ³)
Cimento	295	434
Agregado graúdo	1093	828
Agregado miúdo	749	951
Superplastificante (Peramin F)	1,51	0,95
Aditivo incorporador de ar (Peramin HPA)	-	3,3
Água	202	167

FONTE: Sjunnesson (2005).

TABELA 23 - DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE DE Sjunnesson (2005)

Distâncias de transporte		
Produto transportado	Veículo	Distância (km)
Cimento (da fábrica até o depósito)	Navio médio	800
Cimento (do depósito até a usina)	Caminhão pesado	50
Brita (até a usina)	Caminhão médio-pesado	20
Areia (até a usina)	Caminhão médio-pesado	20
Superplastificante (até a usina)	Caminhão pesado	50
Concreto (até a obra)	Caminhão médio-pesado	100

FONTE: Sjunnesson (2005).

Uma ACV do “berço-ao-portão da obra”, foi desenvolvida por Hsu (2010) para a produção de concreto em Boston (EUA), com cimento produzido em Catskill, Nova York, usando clínquer de uma fábrica próxima e gesso enviado

da Espanha. A areia extraída em Ossipee, New Hampshire, agregado graúdo extraído no Norte de Massachusetts e a usina de concreto em Everett, Massachusetts. O concreto foi levado de caminhão até o local da obra. Essa ACV estudou três tipos diferentes de concretos com resistências de 20 a 35 MPa, estando os resultados dos FE apresentados na Tabela 25, já com as unidades corrigidas do sistema Imperial para o sistema métrico .

TABELA 24 - EMISSÕES PARA CONCRETOS - Sjunnesson (2005)

Materiais e serviços	FE para concretos				
	20-25 MPa	35-45 MPa	Emissões unitárias	20 - 25 MPa	35 - 45 MPa
	Consumos		kgCO ₂ por kg	FE	
	kg por m ³			kgCO ₂ e por m ³	kgCO ₂ e por m ³
Cimento	295	434	0,71000	209,45	308,14
Agregado graúdo	749	951	0,01600	11,98	15,22
Agregado miúdo	1093	828	0,00007	0,08	0,06
Superplastificante (Peramin F)	1,51	0,95	0,69000	1,04	0,66
Água	202	167	-	-	-
Produção	-	-	-	1,50	1,50
Transporte	-	-	-	43,60	46,10
Totais:				267,65	371,67

FONTE: Sjunnesson (2005).

É importante ressaltar que o concreto endurecido captura CO₂ da atmosfera. As reações de hidratação do cimento Portland produzem silicato de cálcio hidratado, aluminatos de cálcio hidratado e cristais de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, estes compostos podem ser solubilizados em água, principalmente os hidróxidos que são muito solúveis. O ar contendo CO₂ penetra nos poros do concreto, através de fissuras ou outros vazios, entrando em contato com os hidróxidos e, em meio úmido, ocorrem reações químicas de carbonatação, formando carbonato de cálcio (CaCO₃) e carbonato de magnésio (MgCO₃). A velocidade da carbonatação depende de diversos fatores, principalmente da temperatura e umidade relativa do ar, porosidade e incidência de fissuras, tipo de meio ambiente (teor de CO₂ do ar) (LAGERBLAD, 2005).

O composto que mais absorve CO₂ do ar é hidróxido de cálcio, composto que representa 20 a 25% da massa do clínquer hidratado (RAMACHANDRAN, 1996). Ocorre que a carbonatação pode se tornar um problema para o concreto, por reduzir o pH e favorecer a corrosão das armaduras, devido a esse motivo as estruturas de concreto são projetadas e construídas de forma a minimizar este fenômeno (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Dessa forma, não é interessante uma eventual contabilização do CO₂ capturado pela carbonatação do concreto (SJUNNESSON, 2005).

TABELA 25 - EMISSÕES PARA CONCRETOS – Hsu (2010)

FE para concretos			
	Concreto 01	Concreto 02	Concreto 03
Resistência a compressão (MPa)	34,5	20,7	20,7
Cinzas volantes (%)	-	-	20
Densidade (kg por m ³)	2.370,7	2.323,0	2.323,0
Materiais – Consumos (kg por m³)			
Cimento	334,6	223,1	178,6
Cinzas volantes	-	-	44,5
Água	140,6	140,6	140,6
Agregado graúdo (kg por m ³)	1.186,6	1.127,2	1.127,2
Agregado miúdo (kg por m ³)	711,9	830,6	830,6
FE (kgCO₂e por m³)	426,7	332,2	302,0

FONTE: Hsu (2010).

2.12. AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Uma argamassa de revestimento é, em geral, constituída por agregados miúdos (areia), de aglomerantes (geralmente cimento Portland ou cal), e aditivos, podendo ser industrializada ou produzida no canteiro da obra. O processo de produção de argamassa industrializada consiste na recepção da matéria-prima, na seleção, dosagem e mistura das mesmas, para posterior ensacamento. Quando produzida no canteiro de obra, pode ser misturada manualmente ou com o auxílio de betoneira (NBR 13529, 2013).

As estimativas das emissões de CO₂ são feitas a partir somatório das emissões individuais dos seus componentes e da energia aplicada na sua produção. Para tanto, é necessário conhecer a sua composição ou traço. Os

aglomerantes tradicionalmente utilizados são a cal e o cimento Portland (CARASEK, 2007).

Costa (2012) em seu trabalho estimou as emissões relativas à produção de diversos traços de argamassas de revestimento. Os traços utilizados foram os do trabalho de Silva (2006). Costa (2012) também calculou a energia necessária para mistura das matérias-primas necessárias para produção de 1.000 kg de argamassa utilizando equipamento elétrico, que resultou em 0,00006 KgCO₂e por kg ou, para uma média das densidades em 0,00012 KgCO₂e por m³.

A cal é formada por hidróxidos de cálcio e magnésio que absorvem CO₂ durante o seu endurecimento. O cimento Portland e a cal, durante a sua hidratação produzem hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio. O ar atmosférico contendo CO₂ penetra na argamassa endurecida, em na presença de umidade, causando reações carbonatação dos hidróxidos de cálcio e magnésio, formando CaCO₃ e MgCO₃ (LAGERBLAD, 2005).

Além de emitirem CO₂ pela sua produção, as argamassas de cal absorvem este GEE quando do seu endurecimento, e a quantidade absorvida é relativa às emissões decorrentes da decarbonatação das matérias-primas durante a fabricação da cal e do cimento. Ao contrário do concreto, a carbonatação das argamassas é benéfica para o material, fazendo com que o revestimento ganhe resistência mecânica e diminua sua permeabilidade.

A quantidade total de CO₂ que pode ser absorvida por uma argamassa depende da quantidade de óxidos presentes. Para se estimar a absorção de CO₂ se faz necessário o conhecimento das quantidades de cal e cimento utilizadas, assim como o tipo do cimento. A carbonatação nas argamassas ocorre com o passar do tempo, isto é, a velocidade da absorção de CO₂ está relacionada com a superfície exposta, porosidade, temperatura, umidade, entre outros fatores.

Regiões dos revestimentos de argamassa podem sofrer carbonatação de forma muito lenta, no estudo da tese de doutorado de Lawrence (2006), O autor avaliou diversas argamassas de cal e cimento, medindo a carbonatação em profundidades de 25 mm, utilizando diferentes tipos de agregados, concluindo que em 365 dias ocorreu a carbonatação de 58 a 100% dos

hidróxidos disponíveis, com a maioria das amostras apresentando valores por volta dos 90% aos 365 dias.

Eleni *et al.* (2014) em uma revisão bibliográfica sobre a velocidade de carbonatação em argamassas de cal, citou níveis carbonatação da cal hidratada de obras com 600 a 900 anos de idade que variam entre 60% e 80%. O mesmo estudo, para revestimentos recentes com espessura limitada a bem poucos centímetros, citou níveis de carbonatação finais de 80% a 92% dentro de um a dois anos, valor percentual que é que em geral utilizado em estudos de ACV de 100 anos.

2.13. OS PAINÉIS DE GESSO ACARTONADO

O gesso é um aglomerante de rápida e fácil aplicação, amplamente utilizado na construção civil como revestimento e em peças pré-moldadas. A matéria-prima é a gipsita, normalmente extraída de minas a céu aberto. A gipsita passa pelo processo de britagem. O hemidrato ou gesso de Paris é obtido pela calcinação da gipsita de 150 à 350°C, quando a gipsita se desidrata parcialmente, originando um sulfato de cálcio hemi-hidratado, conhecido comercialmente como gesso. O hemidrato é obtido pela desidratação parcial da gipsita, liberando apenas água para a atmosfera nessa reação (MUNHOZ e RENÓFIO, 2006 e SEVERO, 2011).

Uma característica relevante é que 95% do gesso brasileiro é produzido na região do vale do rio Araripe, oeste de Pernambuco, divisa com o Ceará, bastante longe do Sul e Sudeste. Costa (2012) calculou como emissões de transporte até o Rio de Janeiro, em caminhão semi-pesado a óleo Diesel (4.778 km incluído o frete de retorno), 296 kgCO₂e por tonelada de gesso ou aproximadamente 2,54 kgCO₂e por m² de painel com 12,5 mm.

Outra característica relevante é que mais de 87,5% da gipsita na região do vale do rio Araripe é desidratada por meio da queima de lenha, consumindo-se uma média de uma tonelada de lenha para desidratar cada tonelada de gipsita, sendo que 52% da lenha não têm origem legal (ALBUQUERQUE, 2012). A lenha de origem legal emite CO₂ biogênico que não é considerado um GEE.

Costa (2012) em seu trabalho, considerando as condições do polo gesseiro da região do Araripe, calculou o FE do hemidrato de gesso (extração e produção), calculou o FE em 342,40 kgCO₂e por tonelada. No mesmo trabalho O autor calculou o FE para placa de gesso (extração e produção), em 470,20 kgCO₂e por tonelada. Adaptando este valor para uma chapa de 12,5mm de espessura chega-se a um FE de aproximadamente 3,95 kgCO₂e por m².

Como informação comparativa, através de diversas EDP levantou-se as emissões por fabricantes internacionais de placas de gesso, que estão colocadas a seguir. Morris (2013) desenvolveu uma EDP para painel de gesso acartonado de 12,5 mm produzido em quatro cidades do Reino Unido, que inclui a extração e processamento de todas as matérias-primas, o transporte para o fabricante das matérias-primas e a energia utilizada no processo de fabricação. Bossenmayer (2013b) desenvolveu uma EDP para painel de gesso acartonado de 12,5 mm de espessura, produzido em três cidades da Turquia, calculando um FE por m². Todos os FE levantados estão apresentados na Tabela 26.

TABELA 26 - EMISSÕES PELOS PAINÉIS DE GESSO ACARTONADO

Painéis de gesso acartonado	
a) Origem:	
Produto: Painel de gesso acartonado produzido Reino Unido	
EDP: berço-ao-portão de saída da indústria	
Fonte: Morris (2013)	Espessura: 12,5 mm
Fator de emissão FE:	2,100 kgCO ₂ e por m ²
b) Origem: Dalsan Gypsum Plasterboards	
Produto: Painel de gesso acartonado produzido na Turquia	
Fonte: Bossenmayer (2013b)	
Espessura: 12,5 mm	
Fator de emissão FE:	1,977 kgCO ₂ e por m ²
d) Origem: Rigips - Standard Plasterboard	
Produto: Painel de gesso acartonado produzido em Horni Pocaply, Republica Checa	
EDP: berço-ao-portão de saída da indústria	
Fonte: Ryan (2015)	Espessura: 12,5 mm
Fator de emissão FE:	2,110 kgCO ₂ e por m ²

2.14. O TRANSPORTE

O transporte de cargas brasileiras tem como participação predominante o modal rodoviário, que apesar das características positivas, tais como flexibilidade, disponibilidade e velocidade, apresenta ineficiência energética e elevados níveis de emissão de poluentes atmosféricos (BORGES NETO, 2011). O modal rodoviário tem elevada dependência dos combustíveis fósseis, tornando este meio de transporte um importante emissor de CO₂ (BARTHOLOMEU, 2006). A queima de combustíveis fósseis emite também, NO_x, CO e NMVOC (*Non-Methane Volatile Organic Compounds* ou Compostos Orgânicos Voláteis não de metano) (IPCC, 2006c).

O IPCC recomenda que as emissões de CO₂ sejam calculadas com base na quantidade e tipo de combustível queimado e seu conteúdo de carbono, analisando as combustões e emissões por evaporação decorrente do uso dos combustíveis nos veículos. O método recomendado em IPCC (2006d) para determinação das emissões de CO₂ estima as emissões a partir do combustível consumido ou da distância percorrida pelos veículos.

Partindo das metodologias recomendadas pelo IPCC (2006d), Costa (2012) estimou as emissões para o transporte rodoviário por caminhão semi-pesado a óleo diesel, considerando diversas distâncias em uma média em 0,0625 kgCO₂e por km por tonelada transportada.

Fazendo uma estimativa para o transporte por meio de um caminhão a Diesel, com carga de 10 toneladas, que tem uma média de consumo de 2,5 litros de Diesel por km (MACEDO, LEAL e SILVA 2004), considerando que o FE para o Diesel é de 2,71 kgCO₂ por litro, (PINGUELLI ROSA, 2011). Com o uso desses valores, obtém-se um FE de 0,1084 kgCO₂e por km para cada tonelada de carga transportada.

2.15. ALGUNS SISTEMAS CONSTRUTIVOS QUE ARMAZENAM CARBONO

Com a finalidade de completar as informações necessárias para o capítulo de Materiais e Métodos, foram analisadas também algumas alternativas técnicas que armazenam carbono nos edifícios, passíveis de serem contabilizadas atendendo as NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14025:2015 e, que estão descritas nos próximos itens.

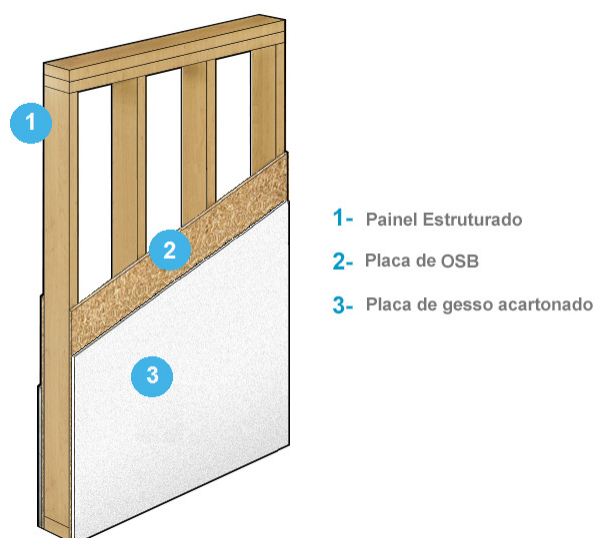
2.15.1. PAREDES DIVISÓRIAS DE MADEIRA TIPO *WOOD FRAME*

Uma forma de se ampliar o uso da madeira nas construções de edifícios convencionais é com a utilização de fechamentos de vedações internas com composições de painéis de madeira e gesso acartonado (Sistemas Leves tipo *Light Wood Frame*). Divisórias internas desta tecnologia não aumentam significativamente o custo da obra e conseguem manter os desempenhos de isolamento mecânico, acústico e de acabamento, que são os mais importantes para este tipo de uso.

A tecnologia da vedação segue o recomendado para atender a Diretriz SINAT Nº 005 do Ministério das Cidades, dentro do programa PBQP-H (SINAT, 2017). O objetivo desta tecnologia é de se produzir uma divisória interna de madeira, com desempenhos técnicos de resistência mecânica e isolamentos acústicos e térmicos.

Os painéis propostos para as vedações das paredes internas são compostos por montantes verticais de madeira com seção de $1\frac{1}{2}'' \times 3\frac{1}{4}''$ espaçados de 40 cm a 60 cm. Horizontalmente na base e no teto são colocadas guias de $1\frac{1}{2}'' \times 3\frac{1}{4}''$ de madeira. Nas aberturas são incluídos montantes para apoio. O fechamento do painel é feito em duas camadas, uma interna com painéis OSB de 10 mm e outra externa com painel de gesso acartonado de 12,5 mm. Todos os componentes são pregados. A espessura total da parede fica em 13 cm, semelhante a uma alvenaria de tijolos cerâmicos. As instalações das portas são executadas de maneira convencional, com espuma de poliuretano ou parafusos. O uso dos painéis de OSB em conjunto com os de gesso acartonado melhora o acabamento e os isolamentos térmico e acústico.

A Figura 11 mostra o esquema das paredes divisórias tipo *Wood Frame* estudado nesta tese.

FIGURA 11 - ESQUEMA DAS PAREDES DIVISÓRIAS TIPO *WOOD FRAME*

FONTE: O Autor (2017).

2.15.2. BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Uma alternativa às paredes divisórias *Wood Frame* que tem impacto menor quanto às mudanças nos processos construtivos usuais de edifícios no residenciais Brasil, mas também tem menor capacidade de armazenar carbono, é o uso de blocos cimentícios com partículas de madeira. Estes blocos foram desenvolvidos na UFPR, dentro do programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal pela pesquisa Villas Bôas (2016).

O bloco desenvolvido é vazado e possui dimensões de 14x19x39 cm iguais às dos blocos comuns de concreto. São passíveis de serem usados nas paredes internas dos apartamentos, em substituição aos blocos de concreto comuns ou de tijolos cerâmicos.

Devido à presença das partículas de madeira, que tem densidade mais baixa que os agregados convencionais, estes blocos têm limitações quanto a resistência mecânica, por esta razão não são indicados para paredes com finalidade estrutural, mas possuem propriedades de isolamento térmico superiores aos blocos de concreto convencionais (VILLAS BÔAS, 2016).

Os insumos ou matérias-primas utilizadas para sua produção foram: partículas de madeira, cimento Portland tipo CP II-Z, cal virgem (CV) e água. Uma imagem dos blocos desenvolvidos na pesquisa é mostrada na Figura 12.

FIGURA 12 - BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA



FONTE: Villas Bôas (2016).

O processo de produção do bloco se iniciou com o pré-tratamento das partículas de madeira com mistura dessas em uma suspensão de cal e água na (na proporção de 1/6), esta ação tem a finalidade de remover os possíveis efeitos inibidores dos extrativos da madeira nas reações de endurecimento do cimento Portland (PARCHEN *et al.*, 2016). Na sequência, foi adicionado cimento CP-II Z com água (relação água/cimento de 0,20) a esta suspensão de cal já hidratada com as partículas de madeira. A mistura foi feita em uma argamassadeira de eixo horizontal. A moldagem e compactação dos blocos foram feitas em uma vibro-prensa hidráulica automática industrial, própria para a produção de blocos de concreto.

Os blocos depois de endurecidos e secos apresentaram uma massa média de 4,645 kg. Os consumos dos materiais por bloco para sua produção foram: 2,264 kg de cimento CP II-Z; 1,184 kg de partículas de *Pinus* spp.; 0,2652 kg de cal virgem e 1,372 kg de água no total (VILLAS BÔAS, 2016).

O bloco possui aproximadamente 25,5% de sua massa (em umidade de equilíbrio com o ar) em partículas de resíduos de *Pinus* spp, que armazenam carbono e a cal utilizada absorve CO₂ do ar.

A cal absorve quando os hidróxidos de cálcio e magnésio formados quando da mistura com água passam a ser carbonatados (LAGERBLAD, 2005). A carbonatação ocorre ao longo do tempo e a taxa de absorção está relacionada com a superfície exposta, temperatura, umidade, entre outros fatores. Eleni *et al.* (2014), em uma revisão da literatura sobre carbonatação em argamassas de cal, citou níveis de carbonatação de até 92% dos hidróxidos

em dois anos, sugerindo que este último valor é geralmente o usado em estudos de ACV de 100 anos.

2.15.3. JARDINS ELEVADOS OU “COBERTURAS VERDES”

Considera-se uma “cobertura verde” como o cultivo de vegetação em solo vegetal em cima de uma cobertura de uma edificação (BALDESSAR, 2012). Rowe (2011) coloca que as “coberturas verdes” podem desempenhar um pequeno papel na redução do CO₂ na atmosfera de duas formas.

Em primeiro lugar, o carbono é um componente importante da estrutura das plantas e é armazenado para os tecidos vegetais através da fotossíntese e no substrato solo via resíduos vegetais e raízes. Este ecossistema artificial serve como um depósito de carbono. Em segundo lugar, as “coberturas verdes” melhoram o desempenho térmico das edificações, minimizando suas necessidades energéticas. O mesmo autor também salienta que embora, uma “cobertura verde” possa atuar como um depósito de carbono é preciso também considerar a energia e emissões que são despendidas para a sua construção.

Santamouris (2014) coloca que as “coberturas verdes” minimizam os efeitos das mudanças climáticas nas cidades, reduzindo aumentos de temperatura decorrentes da formação de ilhas de calor. Li e Yeung (2014) reportam que as “coberturas verdes” melhoram o desempenho dos equipamentos de resfriamento instalados sobre os edifícios, minimizam os picos de descarga de águas pluviais, além de prevenir e reduzir a poluição, absorvendo gases poluentes e CO₂.

Garrison e Horowitz (2012) colocam que as “coberturas verdes” podem desempenhar um pequeno papel na redução CO₂ na atmosfera, isto se deve ao carbono que é armazenado no solo ou substrato de uma “cobertura verde”, assim como do carbono armazenado e armazenado na vegetação desses jardins.

Rowe (2011) cita o trabalho de Getter *et al.* (2009), no qual os autores quantificaram o carbono armazenado por quatro espécies vegetais com um substrato de 6,0 cm de profundidade, onde concluíram que acima do solo foi armazenado em média 0,275 kgC por m². O armazenamento de carbono no substrato com a biomassa radicular o teor de carbono substrato foi em média

de 0,913 kgC por m². No total o sistema extensivo de “cobertura verde” fixou 1,188 kgC por m² em material vegetal combinado com o substrato.

Obviamente um eventual aumento da profundidade do substrato proporciona um maior volume para armazenamento de carbono, também permitiria uma variedade maior de plantas maiores e até mesmo árvores.

De acordo com a Wark e Wark (2003) as coberturas verdes podem ser classificadas como extensivas e intensivas. As especificações básicas para estes tipos de coberturas, colocadas pelos autores citados neste parágrafo, são:

Extensiva, tipo mais simples, apropriada para ervas e gramíneas, exige uma espessura de solo do sistema de 6 a 20 cm, necessitando de uma baixa manutenção e não tem irrigação;

- Semi-intensiva, apropriado para gramíneas e arbustos, exige uma espessura de solo do sistema de 12 a 25 cm, necessitando de manutenção periódica;
- Intensiva, suporta arbustos e árvores exigindo uma espessura de solo do sistema de 15 a 40 cm, exigindo uma manutenção alta, com irrigação regular.

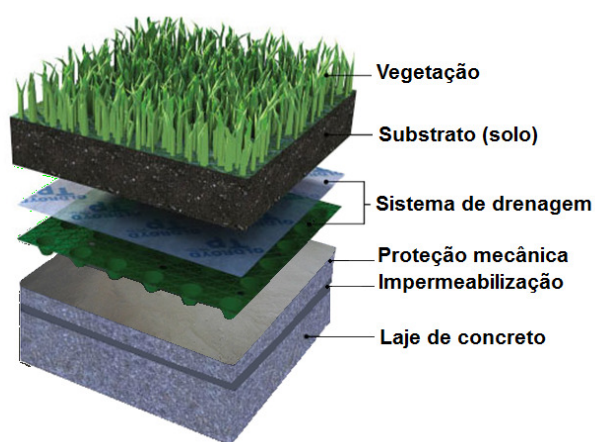
A Figura 13 mostra as camadas que são aplicadas em um sistema de cobertura vegetal ou verde.

A estrutura do edifício deve ser adequada para suportar a capacidade de carga decorrente do sistema, que deve corresponder com o tipo de “cobertura verde” desejada. Para tanto se devem considerar as cargas permanentes, as cargas acidentais, o confinamento da área a ser trabalhada, a construção de beirais mais altos e a previsão de instalação de tubos de dreno (OLIVEIRA, 2009). Portanto a estrutura do edifício deve suportar todas as camadas que compõe o sistema. De acordo com Oliveira (2009) as camadas que compõem este tipo de sistema sobre uma laje são as colocadas a seguir:

- Impermeabilização, que impede a infiltração de água na laje;
- Isolamento térmico;
- Proteção mecânica para proteger a impermeabilização;

- Drenagem, que tem a função de possibilitar a saída do excesso de água;
- Camada de filtragem (facultativa) para impedir a passagem dos substratos para a camada de drenagem;
- Substrato ou a camada de terra ou solo dão suporte à vegetação;
- Vegetação, que consiste na cobertura vegetal propriamente dita.

FIGURA 13 - AS CAMADAS DO SISTEMA DE “COBERTURA VERDE”



FONTE: O Autor (2017).

Segundo Pouey (1998) e Krebs (2005), na avaliação inicial das forças exercidas em uma estrutura de uma cobertura devem ser consideradas as cargas permanentes e as acidentais. As cargas permanentes se referem ao peso do conjunto de todas as camadas do sistema, somando ainda o peso da água retida e da vegetação cultivada. Já as cargas acidentais referem-se à circulação de pessoas e máquinas para a manutenção ou reforma.

Johnson e Newton (1991) colocam que, dependendo do tipo de solo e ao fato de este estar saturado de água ou não, para cada centímetro de espessura, a sua massa varia de 5 a 22 kg por m². A NBR 6120:1980 que trata sobre cargas para o cálculo de estruturas de edificações considera para dimensionamento estrutural, a carga para terra compactada é de 1,800 tf por m³. Como o solo orgânico (terra preta) tem densidade acima de um, para o caso de uma “cobertura verde”, pode-se considerar o valor conservador de carga de 1,550 tf por m³ para a terra vegetal úmida (PIRES, ROSA e TIMM,

2001). Salienta-se, portanto a importância do bom funcionamento da drenagem para evitar o acúmulo de água (PIANCA, 1978).

Dentro desse contexto, uma “cobertura verde” armazena quantidades significativas de carbono na vegetação e no substrato, podendo mitigar parte das emissões de construção de um edifício, ou ao menos, mitigar parte das emissões decorrentes da supressão do solo e da vegetação do local de implantação da obra.

O artigo Freitas *et al.* (2017) apresenta um estudo de caso quanto à viabilidade das “coberturas verdes” armazenarem carbono em um edifício, tendo-se em conta que a estrutura do edifício precisa ser reforçada para suportar a cobertura com seu substrato de solo e vegetação. Os resultados do estudo são amplamente favoráveis, mostrando saldos positivos de armazenamento de carbono de até 385 kgC por m², que é o resultado apresentado para uma cobertura verde com substrato de 35 cm de espessura. Esse último trabalho citado está no Anexo 1 desta tese.

Cabe salientar que neste estudo não estão contabilizadas, tanto as futuras emissões de metano pela decomposição da matéria orgânica, como as absorções de carbono pelo crescimento das plantas.

2.16. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS DE MADEIRA

Os materiais de construção de madeira possuem algumas características favoráveis para o seu uso em edificações, mas também requerem alguns cuidados. Materiais de madeira têm amplo uso em obras de edifícios habitacionais como forros, pisos, divisórias entre outros. O desempenho como isolante térmico dos materiais de madeira é bastante interessante. O comportamento acústico tem algumas vantagens e desvantagens. A madeira, como é um “depósito” de carbono é também um combustível. A baixa massa específica da madeira, (0,13 e 1,40 g/cm³), proporciona materiais de construção leves (MORESCHI, 2005).

A seguir estão algumas discussões sobre essas propriedades:

- Condutibilidade térmica: Uma das características físicas da madeira é apresentar baixa capacidade para conduzir calor, consequência sua estrutura celular com inúmeras pequenas massas de ar aprisionadas por

membranas celulósicas. A condução calorífica em um material é decorrente da transferência das vibrações entre os átomos e/ou moléculas de sua composição. Dependerá principalmente da composição química, da macroestrutura e da textura do material. Considerando os HWP, quanto maior for a sua massa específica, maior será a sua condutividade térmica e quanto maior o teor de umidade, maior será a condutividade térmica. Devido à estrutura porosa da madeira, o seu coeficiente de condutividade térmica é relativamente baixo ($\lambda = 0,12$), o que a caracteriza como um bom isolante de temperatura (MORESCHI, 2005).

- Absorção de energia sonora: Uma característica interessante dos materiais de madeira é a sua absorção das ondas sonoras. As ondas dos sons são movimentos vibratórios que se propagam pelo ar ou outros meios com amplitudes e frequências variadas. Quanto maior a amplitude da onda, maior a intensidade sonora, quanto maior a frequência, mais agudo é o som. Há fenômenos acústicos bastante complexos que interferem no desempenho quanto ao isolamento acústico pelos materiais de construção e a transmissão sonora através dos ambientes, como a difração, a ressonância, a reverberação e a absorção (MORESCHI, 2005).

A NBR 15575:2013 estipula critérios para a atenuação acústica dos ruídos de impactos aplicados às lajes de piso e para o isolamento do som entre os pisos de um edifício. Considera ainda a necessidade de isolamento acústico das paredes entre unidades habitacionais autônomas e de paredes divisórias entre áreas privativas e áreas comuns nos edifícios.

Para alcançar-se um adequado isolamento acústico som, deve-se diferenciar a propagação de som pelo ar e através dos materiais sólidos. A propagação sonora no ar depende da relação da reflexão ou absorção do som pelos materiais de construção, é influenciada pela geometria e textura das peças (MORESCHI, 2005).

A absorção do som depende do valor da sua frequência. A madeira tem um grau de absorção relativamente grande quando comparada a outros

materiais usuais nas construções, por absorver mais as frequências baixas que as altas, característica interessante para ambientes fechados (MORESCHI, 2005).

A propagação do som através de uma parede é decorrente da vibração causada pela incidência do som de um lado da mesma e é transferida para o outro lado. Relativamente ao som aéreo a eficiência de isolamento sonoro de uma parede é regida pela lei das massas, quanto maior a massa menos vibra e transmite o som, dependendo também da sua frequência. Uma divisória de madeira em geral tem menor eficiência no isolamento das baixas frequências (MORESCHI, 2005).

Para os ruídos de impacto quanto mais denso o material, maior a transmissão acústica resultante do caminhar de pessoas em andares superiores. O isolamento desse tipo de propagação do som só pode ser satisfatoriamente alcançado com a incorporação de um material absorvedor acústico sobre a laje de piso para amenizar a passagem das vibrações das ondas de som (CBIC, 2013).

- Madeira como combustível: Uma característica óbvia para qualquer material que armazena carbono, como a madeira, é de que o mesmo também é um reservatório de energia, que pode ser liberada pela sua queima. O perigo desta energia armazenada dentro das edificações é motivo de regulação pela NBR 14432:2001. Essa norma, em seu anexo C, coloca os valores de cargas de incêndio ou energia por unidade de área das edificações em MJ por m². A NBR 14432:2001 recomenda considerar, para edifícios residenciais, a carga de incêndio 300 MJ por m². Para esta carga de incêndio as normas de projetos estruturais recomendam o dimensionamento das estruturas para resistência a incêndios.

A quantidade de energia armazenada pela madeira pode ser definida como o seu poder calorífico ou como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa. O poder calorífico da madeira relevante para este trabalho é o identificado como poder calorífico inferior. Essa é a energia disponível por unidade de massa após deduzir as perdas com a evaporação da água. O poder

calorífico da madeira varia principalmente conforme a densidade da madeira. A densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a produção de energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por metro cúbico (QUIRINO *et al.*, 2005).

O trabalho de Quirino *et al.* (2005) sobre o poder calorífico de diversas espécies florestais brasileiras, chegou a valores que variam de 3.092 a 4.174 kcal por kg (12,95 a 17,48 MJ por kg). Considerando um valor conservador de poder calorífico de 20 MJ por kg, isto significa que a NBR 14432:2001 recomenda dimensionar as estruturas de edifícios residenciais para suportar aproximadamente 15 kg por m² de produtos de madeira (considerando que não há a presença de nenhum outro produto combustível). Cabe salientar que o valor de 300 MJ por m² é considerado pela NBR 14432:2001 para a soma de todas as energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão, inclusive móveis, pisos, divisórias, etc.

É importante observar aqui, que existem diversas formas de minimizar o risco de ignição de materiais madeira, como isolá-los termicamente, adicionar agentes químicos antignífugos aos compostos de painéis, a aplicação de pinturas intumescentes, entre outros.

2.17. FORMAS DE LEVANTAMENTO DAS EMISSÕES DA CONSTRUÇÃO

Devido a metas acordadas internacionalmente pelo governo brasileiro, foi definida em Lei a criação da Política Nacional de Mudanças Climáticas, que deu início a um processo de alocação de metas legais para diferentes setores da economia brasileira. As discussões neste campo prosseguem, sendo esperado que resultem no futuro em um ambiente regulatório a ser implementado no Brasil, o qual acabará por afetar principalmente os setores que causam maiores emissões de GEE. Um desses setores é o da construção civil, que é evidentemente relevante e estratégico para economia brasileira (SINDUSCON-SP, 2013).

Dentro desse contexto, diversas construtoras e incorporadoras vêm tomando iniciativas no sentido de estabelecer processos de gestão de suas

emissões. A primeira ação é confeccionar seus Inventários de Emissões de GEE para que se possa analisar o problema, comparar resultados e implementar medidas de gestão para reduzir as suas emissões (SINDUSCON-SP, 2013).

Um objetivo relevante para a publicação desses relatórios de emissões de GEE é a possibilidade das empresas participar do Índice de Sustentabilidade Empresarial da Bolsa de Valores de São Paulo, BM&F Bovespa.

O setor da construção civil difere dos demais por algumas características peculiares do seu “produto”, as “obras”. Em primeiro lugar, dificilmente uma obra é repetição idêntica de outra, fato que dificulta comparações. Por segundo, uma obra leva um período longo de produção, quase sempre superior a um ano, que é a periodicidade recomendada pelo *GHG Protocol* para a emissão e relatórios que quantificam as emissões de GEE provenientes da atuação dos setores.

O *GHG Protocol* é uma ferramenta de contabilidade internacional, que segue os padrões da norma NBR ISO 14064-1:2007, que permite compreender, quantificar, e gerenciar os GEE, amplamente utilizado por governos e empresas de todo o mundo. O *GHG Protocol* fornece um quadro contábil para a medição dos GEE padrões existentes e a sua conversão em CO₂ (FGV, 2009).

Visando disseminar e focar nas soluções para o problema, o SINDUSCON-SP em 2013 publicou o seu Guia Metodológico para Inventários de emissões de GEE na Construção Civil, voltado para empresas construtoras ou incorporadoras do mercado imobiliário.

O sistema proposto pelo SINDUSCON-SP (2013), que está se iniciando a aplicação nas empresas de construção civil, é o controle das emissões a partir de seus inventários. Um Inventário de GEE mede uma realidade física de fato ocorrida das emissões. Para sua confecção, utilizam-se os quantitativos aplicados na obra e os respectivos FE. Para cálculo das emissões individuais dos materiais e serviços são utilizados os FE informados pelos fornecedores. No caso da indisponibilidade desses, podem ser utilizados FE genéricos, fornecidos por entidades setoriais responsáveis, por organismos como o IPCC,

ou ainda FE disponíveis em bases de dados nacionais ou internacionais (SINDUSCON-SP, 2013).

Estes FE devem seguir o conceito de pegada de carbono dos respectivos produtos, devendo conter todas as emissões ocorridas na cadeia integral de produção, desde a extração das matérias-primas, todas as etapas de transformação e de transporte que ocorrem até a entrega do produto nas obras (SINDUSCON-SP, 2013).

As emissões decorrentes da queima de combustíveis para o transporte de pessoas materiais e resíduos de ou para a obra são importantes. Para eles deve-se utilizar o consumo de combustível consumido e o FE desse combustível utilizado. Na ausência de dados sobre consumo efetivo de combustíveis, os dados utilizados serão a carga transportada e a distância percorrida, utilizando-se os FE correspondentes, para cada combustível e modal utilizado (SINDUSCON-SP, 2013).

Um inventário deve ser desenvolvido seguindo os princípios gerais enunciados pelo IPCC (2006e), *GHG Protocol* (FGV, 2009) e NBR ISO 14064-1:2007, que devem ser aplicados em todas as decisões a serem tomadas ao longo do processo.

Especificamente para empresas construtoras ou incorporadoras do mercado imobiliário, o manual do SINDUSCON-SP (2013) indica que a unidade organizacional básica para o inventário é a obra. Dessa forma, em um inventário de obra, a atividade inventariada é a construção de um empreendimento, desde seu início até sua entrega aos usuários.

Outra forma de levantamento das emissões de uma obra é a confecção de uma ACV cuja modelação começa no nível do local de implantação e dos materiais de construção utilizados etapas, abordando a fase das obras de construção, incluindo a extração e a transformação das matérias-primas em materiais de construção. As ACV são mais aprofundadas que os relatórios de emissões.

O perfil típico de emissões da construção civil indica que os maiores grupos de fontes de emissão estão localizadas nos materiais de construção,

especialmente a produção do cimento e do aço. Os outros grupos de fontes seguem com relevâncias menores.

O manual do SINDUSCON-SP (2013), seguindo a NBR ISO 14064-1:2007 recomenda considerar como “emissões de fontes renováveis”, aquelas que são precedidas por remoções recentes, em quantidade correspondente, de GEE, não acarretando, portanto, acréscimo no estoque de GEE na atmosfera. Enquadram-se nesta categoria as emissões da queima de biocombustíveis, emissões resultantes do plantio e processamento de vegetais, ou a biomassa derivada de madeira plantada com fins comerciais. Esta consideração se justifica porque as emissões são precedidas por remoções correspondentes e recentes, por meio da fotossíntese.

O manual do SINDUSCON-SP (2013), seguindo a NBR ISO 14064-1:2007 também recomenda, considerar emissões de fontes não renováveis, aquelas que não são precedidas de remoções, ou que o são, porém de forma muito distante no tempo (combustíveis fósseis). Da mesma forma as emissões do desmatamento não originadas de manejo sustentável, são consideradas como não renováveis.

Essas emissões de fontes não renováveis são consideradas como efetivamente causadoras do aumento da concentração de GEE na atmosfera, fato que não ocorre com as emissões de fontes renováveis. Por esta razão o SINDUSCON-SP (2013) recomenda cuidados na sua contabilização, que estão colocados a seguir:

- As emissões de CO₂ de fonte renovável devem ser contabilizadas em separado das de fonte não renovável.
- As emissões de outros GEE, mesmo que sejam de fonte classificada como renovável, devem ser contabilizadas como de fonte não renovável;
- As remoções de CO₂ devem ser contabilizadas em separado, sendo ao final do relatório seu total apresentado em separado ISO 14064-2:2006.

Outra característica da atividade da construção civil é frequente supressão de vegetação. O manual do SINDUSCON-SP (2013), seguindo a NBR ISO 14064-1:2007 recomenda que as emissões desta atividade sejam contabilizadas com base em um Inventário Florestal da área desmatada. Deve

ser considerado somente o desmate que tenha ocorrido dentro do intervalo de tempo do início ao a final da obra.

O cálculo das emissões deve ser feito assumindo que o carbono contido na vegetação é oxidado e convertido em CO₂e, como ocorre no processo de queima ou degradação aeróbia.

É importante ressaltar aqui que para estes relatórios ainda não é recomendada a contabilização do carbono presente no solo, fator que pode gerar diferenças significativas em relação às emissões levantadas por uma ACV.

Os usos provisórios da madeira nas obras como elementos de formas, escoramento e outros usos provisórios causam emissões na devido a sua degradação ao final da sua vida útil, seja por uma eventual queima ou degradação aeróbia. O carbono contido nos tecidos vegetais combina-se com o oxigênio da atmosfera formando CO₂. Eventual estoque de madeira proveniente de uso em obras anteriores não devem ter suas emissões contabilizadas.

A emissão do uso da madeira deve ser contabilizada conforme os procedimentos seguintes, segundo o manual do SINDUSCON-SP (2013):

a) Madeira plantada adquirida

As emissões do uso da madeira originada de florestas plantadas com fins comerciais são consideradas renováveis. Devem ser computadas na categoria “Emissões de fontes renováveis”, com o total do carbono contido na madeira devendo ser considerado oxidado e convertido em CO₂e, como ocorre na queima ou degradação aeróbia.

b) Madeira nativa adquirida

É considerada madeira nativa toda aquela originada da vegetação nativa, colhida com autorização legal, às emissões devem ser consideradas como de GEE. No caso de madeira nativa originária de manejo sustentável de florestas nativas, as emissões correspondentes podem ser classificadas como de fonte renovável, desde que haja a devida certificação pela CERFLOR, FSC ou outra entidade reconhecida. O cálculo deve ser feito assumindo que o total do carbono contido na

madeira é oxidado e convertido em CO₂e, como ocorre no processo de queima ou degradação aeróbia.

2.18. AS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PARA EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Neste item estão apresentados os resultados de documentos que mostram as emissões decorrentes da construção de edifícios residenciais. Alguns documentos são ACV internacionais, outros trabalhos científicos nacionais e também relatórios empresariais de emissões de uma construtora nacional.

O relatório de emissões empresariais EVEN (2015), para o ano de 2014 contém, as médias de emissões para edifícios residenciais em concreto armado com FE de 167,1 kgCO₂e por m² e as médias de emissões para edifícios residenciais em alvenaria estrutural de blocos de concreto com FE de 162,2 kgCO₂e por m². O relatório da mesma empresa EVEN (2016), para o ano de 2015 mostra valores semelhantes, com as médias de emissões para edifícios residenciais em concreto armado com FE de 154,98 kgCO₂e por m² e as médias para edifícios residenciais em alvenaria estrutural de blocos de concreto com FE de 145,69 kgCO₂e por m².

Outra informação relevante contida no relatório EVEN (2016) cita que companhia custeou a mitigação de 100% das suas emissões de GEE, apoiando projetos que adquiriram créditos de carbono através da metodologia VCS (*Verified Carbon Standard*) e REDD + (Redução de Emissões Provenientes de Desmatamento e Degradação Florestal a partir do Manejo Sustentável das Florestas) e Energia Renovável.

Outro detalhe interessante existente no relatório EVEN (2015), sobre as emissões para o conjunto das obras da empresa no ano de 2014, mostra que 86% dessas são concentradas em dez atividades e materiais, conforme apresentado na Tabela 27.

Em 2010 publicou-se um estudo desenvolvido para um edifício residencial de quatro pavimentos em Curitiba, mostrado na Figura 14, com estrutura em concreto armado e vedações em tijolos cerâmicos. Por meio de um levantamento de emissões dos principais materiais e serviços da obra onde

os autores chegaram a um FE de 205,7 kgCO₂e por m² (FREITAS, PARCHEN e PARCHEN, 2010).

TABELA 27 – REPRESENTATIVIDADE DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES

Atividades	Emissões em %
Superestrutura – concreto	28,79
Infraestrutura – fundações	15,24
Alvenarias e vedações	10,60
Superestrutura – armações	5,97
Azulejos e cerâmicas - pisos e paredes	3,83
Contrapisos e cimentados	3,23
Esquadrias de alumínio	3,42
Esquadrias de ferro	3,07
Impermeabilização	3,07
Revestimentos de argamassas externas	1,89
Total:	86,03 %

FONTE: EVEN (2015).

Stachera e Casagrande em 2008 publicaram um estudo sobre as emissões de CO₂ pela construção de casas populares de 40 m² no Paraná, no qual os autores chegaram a um FE de 224 kgCO₂e por m². Neste mesmo trabalho, os autores citam que casas de 200m² construídas na Bélgica alcançaram valores de emissões de 235 kgCO₂e por m².

ACV de edifícios residenciais ainda são muito raras, mas a União Europeia criou uma comissão da para promover o uso de ACV com a finalidade de aperfeiçoar o desempenho ambiental de edifícios que criou um projeto chamado *ENSLIC Building*.

Uma ACV é mais completa que um relatório de emissões e tende a produzir resultados superiores. Ressalta-se que em uma ACV é possível se computar o carbono armazenado. Também importante de se observar é que edifícios localizados em climas mais frios e sob a “jurisdição” de Normas Técnicas mais rigorosas, como são os casos europeus obtidos do *ENSLIC Building*, criam condições que causam aumento de emissões.

Cabe salientar que obviamente os FE da construção dos edifícios variam de acordo com os projetos arquitetônicos, as tecnologias construtivas aplicadas e a forma de como o cálculo das emissões é feito.

A ACV do *ENSLIC Building* para um edifício residencial em Zaragoza (Espanha), Estudo de caso 1- parcela 12 (ENSLIC BUILDING, 2010a), que foi construído em 2006, permite calcular o FE de 395 kgCO₂e por m². Outra ACV do mesmo estudo, outro edifício também em Zaragoza, o Estudo de caso 2- parcela 24, igualmente construído em 2006, possibilita calcular o FE de 404 kgCO₂e por m². O mesmo instituto também publicou a ACV para um edifício residencial em Frankfurt (Alemanha), da qual se permite calcular o FE de 194 kgCO₂e por m² (ENSLIC BUILDING, 2010b).

Estes valores foram obtidos das ACV a partir das emissões que ocorrem até a fase de produção dos edifícios, considerando suas áreas construídas. As Figuras 15, 16 e 17 mostram as imagens dos edifícios em Zaragoza (Espanha) e em Frankfurt (Alemanha).

FIGURA 14 - EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM CURITIBA OBJETO DE TRABALHO CIENTÍFICO SOBRE EMISSÕES



FONTE: Freitas, Parchen e Parchen (2010).

FIGURA 15 - EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM ZARAGOZA (ESPANHA), ESTUDO DE CASO 1, PARCELA 12, OBJETO DE ACV



FONTE: ENSLIC BUILDING (2010a).

FIGURA 16 - EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM ZARAGOZA, (ESPANHA) ESTUDO DE CASO 2, PARCELA 12, OBJETO DE ACV



FONTE: ENSLIC BUILDING (2010a).

FIGURA 17 - EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM FRANKFURT (ALEMANHA), OBJETO DE ACV



FONTE: ENSLIC BUILDING (2010b).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de se aperfeiçoar os controles de emissões de GEE das obras de construção, em especial a confecção de relatórios de emissões ou de uma ACV, é importante contabilizar o carbono de origem não fóssil armazenado nas obras quando prontas, porque este carbono mitiga as emissões. Esta consideração é permitida e recomendada pelas normas técnicas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISSO 14025:2015.

Este trabalho concentrou-se no estudo de edifícios residenciais construídos no Brasil, focando as práticas construtivas usuais em São Paulo, que são muito semelhantes às aplicadas em Curitiba.

Para estimar as quantidades de carbono que são armazenadas nos edifícios residenciais, estudou-se: materiais de construção de ou com madeira de uso permanente (não temporário durante a obra), “coberturas verdes” e as argamassas de revestimento que contém cal e cimento, por essas absorverem CO₂ do ar.

Os materiais de ou que contém madeira foram divididos em “usuais”, que são os que normalmente já são aplicados nos apartamentos e nos “não usuais”, que são algumas alternativas técnicas sugeridas. Essas sugestões não prejudicam as características funcionais e de acabamentos dos apartamentos, acrescentam pouco custo e obviamente estocam carbono. Os impactos de custos foram estimados de forma simplificada, utilizando-se o Custo Unitário Básico (CUB) de construção e os custos de mercado de aplicação dos materiais “não usuais” sugeridos.

Os materiais “usuais” são as portas, pisos, e forros com os respectivos acessórios. Os materiais “não usuais” sugeridos foram: painéis de MDP como isolante acústico em pisos, paredes internas em *Wood Frame* e paredes internas com blocos cimentícios com partículas de madeira. Estes materiais já estão dentro dos valores do CUB.

Desses materiais “usuais” e dos “não usuais” reuniram-se amostras comerciais de produtos comuns disponíveis para a construção civil e mediram-se as quantidades de carbono estocadas nestes. O mesmo fez-se com o solo de substrato utilizado nas “coberturas verdes”.

Com o intuito de se avaliar a relevância do impacto desse carbono armazenado quanto à mitigação das emissões de construção dos edifícios residenciais, foram necessárias duas ações.

Primeiro montou-se um conjunto representativo de projetos de apartamentos residenciais de São Paulo. Este conjunto representativo de cinco apartamentos de diversos tamanhos foi montado de forma a contemplar imóveis de quase todo o espectro de tamanhos, com apartamentos de áreas de 61 m² até 476 m². Estes apartamentos foram também escolhidos por serem ou estarem sendo construídos por uma grande empresa nacional que publica periodicamente relatórios de emissões de GEE. Para este trabalho mediu-se as quantidades dos materiais estudados que estocam carbono que são aplicados nos apartamentos.

Em segundo, para obter-se valores de referência de FE de construção de edifícios residenciais, analisou-se uma série de documentos, (nacionais: relatórios de emissões e artigos científicos; internacionais: ACV europeias). Dentro da série de documentos analisados foram selecionados os que tratam sobre os edifícios mais semelhantes aos dos apartamentos representativos. Com as informações contidas nestes documentos selecionados, estimaram-se valores de FE base de construção para edifícios em concreto armado e para edifícios em alvenaria estrutural.

Com estes valores, calculou-se as mitigações em percentual desses FE base além de valores em kg de carbono (kgC) por m² de cada apartamento do conjunto representativo. Dessa forma, obteve-se uma ordem de grandeza geral dos efeitos dessas mitigações.

Procedeu-se também uma análise das capacidades de mitigações de emissões de “coberturas verdes” para edifícios inteiros, tendo em vista que estas também armazenam carbono, mas demandam reforços nas estruturas para suporta-las.

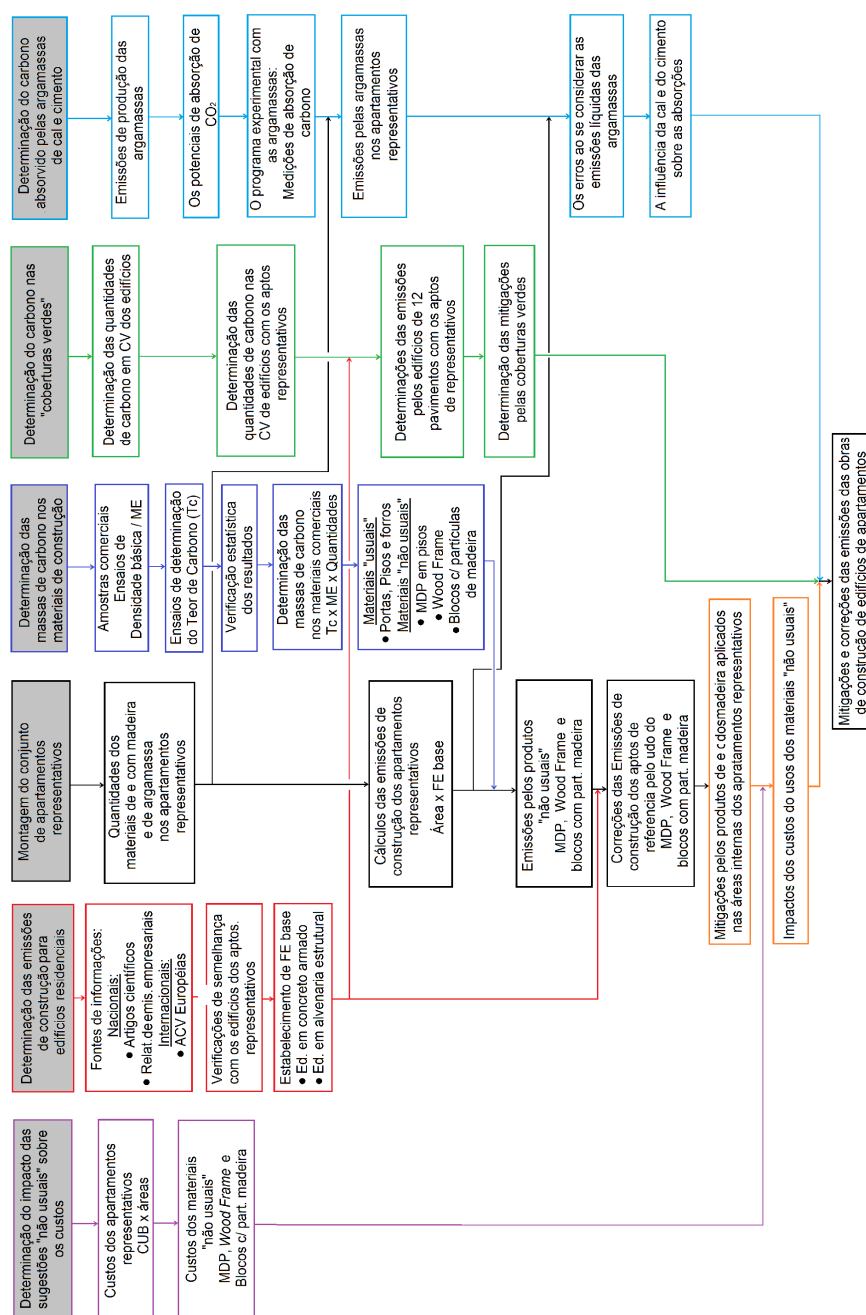
Devido ao fato das argamassas de cal e cimento, usadas nos revestimentos, absorverem carbono durante o seu endurecimento, para atender às normas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14025:2015, deve-se declarar separadamente as emissões das absorções de CO₂. Fez-se uma

análise do tamanho do erro que se incorre ao se declarar diretamente as emissões líquidas dessas argamassas em uma ACV ou relatório de emissões.

Cabe observar que neste trabalho as unidades de massa, comprimento e área utilizadas utilizou-se as unidades que são aplicadas nas Declarações Ambientais de Produtos pela norma NBR ISO 14025:2015.

A Figura 18 mostra um diagrama com o fluxo geral da pesquisa.

FIGURA 18 - FLUXO GERAL DA PESQUISA



FONTE: O Autor (2017).

3.1. A DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PARA OS EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Por meio de uma análise criteriosa de informações publicadas, por diversas fontes, sobre as emissões de GEE decorrentes da construção de edifícios residenciais, com a finalidade de se estimar valores de referência para as emissões dessas construções no Brasil.

Com as informações dos documentos selecionados, estimaram-se valores de um FE base de construção para edifícios com estruturas em concreto armado e outro FE base para edifícios construídos em alvenaria estrutural.

Os valores dos FE base foram ajustados para números inteiros com o intuito de facilitar a avaliação do impacto das mitigações. Cabe ressaltar que estes são apenas valores de referência, utilizados neste trabalho para se calcular os percentuais de mitigações que se alcançam com a estocagem de carbono nos materiais de e com madeira.

Foram analisados valores de obras no Brasil, publicados em relatórios de emissões de uma construtora para diversos edifícios EVEN (2012), EVEN (2015) e EVEN (2016). Também foram analisados os resultados de pesquisas científicas de levantamentos de emissões, sobre edifícios residenciais, publicados em Freitas, Parchen e Parchen (2010) e Stachera e Casagrande (2008). Com o mesmo fim, analisaram-se os resultados de ACV de construções de três edifícios residenciais europeus, obtidos a partir de relatórios publicados pelo *ENSLIC Building*, ENSLIC BUILDING (2010a) e ENSLIC BUILDING (2010b).

Selecionou-se estes documentos por tratarem-se de edifícios residenciais, com apartamentos semelhantes aos do conjunto representativo, cujas plantas estão apresentadas no APÊNDICE 1.

3.2. A DETERMINAÇÃO DAS MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Com o intuito de se determinar as quantidades de carbono presentes nos materiais de construção de ou com madeira, que são utilizados em

aplicações permanentes (não provisórias) nos edifícios residenciais, reuniram-se amostras de produtos comerciais amplamente consumidos pelo mercado da construção civil.

Os produtos comerciais selecionados foram:

- Folhas de portas de uso interno (com diversos vãos);
- Batentes para portas em madeira maciça (*Eucalyptus*, 14 cm de largura);
- Batentes para portas em EGP (*Edge Glued Panel*) de *Pinus* spp. (14 cm de largura);
- Alizares em madeira maciça (*Eucalyptus*);
- Alizares em EGP de *Pinus* spp.;
- Pisos em MDF (*Medium Density Fiberboard*) laminados AC3 e AC4 (NBR 14833-1:2009);
- Pisos de madeira maciça (ipê e jatobá);
- Rodapés em madeira maciça (ipê e jatobá);
- Rodapés em MDF;
- Forros de madeira maciça (jatobá);
- Madeira maciça (cedrinho) para estruturas dos forros;
- Madeira maciça tratada (*Pinus* spp.) para divisórias *Wood Frame*;
- Painel OSB (*Oriented Strand Board*);
- Painel de gesso acartonado;
- Solo orgânico (terra preta) utilizado em “coberturas verdes”;
- Blocos cimentícios com partículas de madeira.

As amostras dos produtos de madeira e derivados foram pesadas em umidade de equilíbrio ao ar e secas, para se medir as densidades básicas, as massas específicas e massas por unidade comercial de cada produto. As densidades básicas das amostras foram medidas conforme a NBR 11941:2003. As densidades das amostras dos solos orgânicos foram medidas através do método do anel volumétrico (WHITTINGHILL *et al.*, 2014). Os painéis de gesso acartonado foram desmontados para avaliar o papel cartão de revestimento separadamente. O bloco cimentício foi estudado de forma específica a qual se detalhou mais adiante.

Para cada material analisado obteve-se ao menos duas amostras de produtos diferentes. De cada uma dessas amostras preparou-se cinco subamostras. As subamostras dos materiais de madeira maciça, de EGP e OSB foram obtidas por trituração e homogeneização simples. As folhas de portas tiveram suas subamostras cuidadosamente preparadas, de forma que cada parte componente da folha estivesse adequadamente representada, conforme foi descrito no artigo Freitas *et al.* (2015). As subamostras dos painéis de gesso acartonado foram preparadas desmontando-se estes para se medir unicamente o Tc do papel cartão de revestimento.

Para as determinações dos Tc se utilizou o equipamento analisador LECO 144 do Biofix (Engenharia Florestal - UFPr). Procederam-se no analisador as análises das cinco subamostras de cada produto.

Nas determinações de Tc a amostra é submetida à combustão empregando-se ambiente de oxigênio puro a 1350°C, onde ocorre um processo de redução oxidativa que faz com que os compostos que contenham carbono quebrem e o liberem. A partir do sistema de combustão, os gases sofrem a remoção total da umidade. Na sequência, uma célula de detecção de infravermelho mede a concentração de dióxido de carbono. O instrumento converte estes valores em porcentagem, usando uma equação predefinida no software que leva em conta a massa da amostra, a calibração e o valor de umidade conhecida.

Sobre os resultados dos Tc se procedeu a análises estatísticas de médias, desvios padrão e coeficientes de variação em porcentagem e verificação de homogeneidade.

A homogeneidade estatística das amostras foi verificada usando-se o teste não paramétrico de aderência à distribuição Normal de *Shapiro-Wilk* (SW). Aplicou-se o Teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade para verificar se as médias dos resultados medidos não diferem estatisticamente entre si.

Partindo-se das médias dos Tc obtidos experimentalmente de cada um dos produtos, multiplicando essas pelas suas massas, foram calculadas as massas de carbono presentes nas amostras cada produto comercial. As massas utilizadas foram as médias dos resultados medidos com a umidade em

equilíbrio com o ar (ou $\pm 12\%$). Para os blocos cimentícios calculou-se o Tc por um método específico para este, considerando-se não somente o carbono presente na madeira, como também, o CO₂ absorvido pela cal.

Validaram-se os resultados obtidos comparando-se com alguns resultados de pegada de carbono de um produto (PCP) publicados em Declarações Ambientais de Produtos (*Environmental Product Declaration* - EPD) de fabricantes internacionais, que são documentos produzidos por laboratórios de primeira linha e devidamente auditados.

3.3. MONTAGEM DO CONJUNTO DE APARTAMENTOS REPRESENTATIVOS E AS QUANTIDADES DOS MATERIAIS QUE ARMAZENAM CARBONO

Com o intuito de se avaliar o impacto do carbono fixado nos materiais de construção aplicados nos edifícios residenciais, foi selecionado um conjunto de cinco apartamentos reais existentes em São Paulo, sendo estes semelhantes a muitos outros existentes em todo o Brasil. O conjunto foi montado de forma a representar a grande maior parte do espectro de tamanhos de apartamentos do mercado imobiliário. O conjunto representativo selecionado contém apartamentos de 61,5 a 476,3 m². Outro critério importante para a sua escolha foi o de a construtora publicar relatórios de emissões de GEE das suas obras.

Os cinco apartamentos representativos selecionados foram identificados por “A”, “B”, “C”, “D” e “E”. As plantas desses apartamentos estão apresentadas no APÊNDICE 1.

Para cada apartamento representativo foram levantadas as quantidades aplicadas dos materiais estudados que armazenam carbono. Com a variação dos tamanhos dos apartamentos, variam também os padrões de acabamentos.

As áreas de pisos de madeira e as portas são identificáveis nas plantas, consideraram-se as áreas de forros as áreas das sacadas. Para as paredes divisórias foram consideradas as áreas de paredes internas de áreas secas (não das cozinhas, banheiros e AS). Para as argamassas de cal e cimento mediram-se as áreas revestidas e respectivos volumes aplicados nos tetos e paredes. Nos edifícios em concreto armado, ou de “A” a “D”, considerou-se uma espessura média de revestimento de 2,5 cm de argamassa, para o edifício “E”

construído com blocos de concreto estruturais, considerou-se uma espessura média de 2 cm. Com estes volumes calcularam-se as emissões e as absorções de CO₂ para cada apartamento.

3.3.1. MONTAGEM DOS CENÁRIOS DE QUALIDADES DE ACABAMENTOS DOS MATERIAIS “USUAIS”

Dentro do conjunto dos diferentes produtos “usuais”, para compor a realidade dos acabamentos dos apartamentos representativos, conforme os seus tamanhos e padrões de qualidade, foram criados dois cenários diferentes.

O primeiro cenário, que foi aplicado nos apartamentos “A” e “B”, representa um padrão mais elevado de custo e qualidade, e é composto por portas com face laminada em madeira e interior preenchido de MDP (partículas de média densidade), batentes e alizares em madeira maciça (*Eucaliptus*), piso e rodapés também em madeira maciça (ipê).

O segundo cenário, que foi aplicado nos apartamentos “C” “D” e “E”, representa um padrão mais simples, e é composto por portas para pintura com interior preenchido por sarrafeado de *Pinus* spp., batentes de EGP de *Pinus* spp., alizares em EGP de *Pinus* spp., piso em MDF laminado de 7 mm e rodapés em MDF revestido em papel colado sob baixa pressão.

Para os dois cenários o forro foi de jatobá e a estrutura para este em cedrinho.

3.4. DETERMINAÇÃO DO CARBONO PRESENTE NOS PRODUTOS “USUAIS” DE MADEIRA

Verificou-se o impacto para os materiais “usuais” quanto ao armazenamento de carbono por nos cinco apartamentos representativos, comparando-se os valores do carbono armazenado com os valores das emissões. Calcularam-se as emissões de construção com o FE base de produção dos edifícios. O carbono armazenado foi calculado com os resultados do programa experimental. De posse desses valores estimou-se quanto o carbono armazenado mitiga das emissões de produção.

3.4.1. A MITIGAÇÃO PELOS MATERIAIS “USUAIS”

Para avaliar-se a capacidade dos materiais usuais quanto a “mitigação” de parte do CO₂ emitido pela construção dos apartamentos, utilizou-se os FE base estimados de 200 kgCO₂e por m² para edifícios em concreto armado e 188 kgCO₂ por m² para edifícios em alvenaria estrutural.

Multiplicando-se estes FE pelas áreas dos apartamentos, obtiveram-se as emissões totais teóricas da construção. Com estes resultados e os totais de carbono armazenado nos materiais “usuais”, procedeu-se o cálculo das mitigações em percentual e em percentuais e por áreas dos apartamentos representativos.

3.5. O CARBONO NAS APLICAÇÕES DE MADEIRA “NÃO USUAIS”

Apresentaram-se algumas alternativas para aplicações de madeira “não usuais” que acrescentam carbono, por meio de produtos de madeira, nos apartamentos representativos. Essas alternativas foram sugeridas em função das seguintes características:

- Permitem aumentar as aplicações de produtos de madeira às obras de edifícios residenciais;
- Acrescentam pouco ou nenhum custo;
- Não causam prejuízos técnicos de desempenho mecânico, térmico ou acústico, quando comparadas com as soluções tradicionalmente aplicadas;
- Não causam prejuízos estéticos.

As alternativas técnicas sugeridas foram:

- Painéis MDP (25 mm), sob os pisos laminados para isolamento acústico;
- Paredes divisórias internas em *Wood Frame*;
- Paredes divisórias internas com blocos cimentícios com partículas de madeira.

3.5.1. O CARBONO NO ISOLAMENTO ACÚSTICO COM OS PAINÉIS MDP

A primeira sugestão de alternativa técnica “não usual” foi de aplicação de derivados de madeira em apartamentos foi o uso de painéis MDP com 25 mm de espessura para minimizar a passagem de sons entre lajes.

Esta técnica pode ser aplicada em áreas secas, com o painel MDP sendo colocados sobre o contrapiso e sob os pisos de madeira.

O motivo da escolha de painéis MDP é devido ao fato desse painel possuir camadas internas com densidades diferentes, característica física que dificulta a passagem das diferentes frequências de sons.

Para os cálculos desse item foram utilizados os valores de emissões e de armazenamento de carbono publicados na EDP da WOODSOLUTIONS (2015) para painéis MDP com 25 mm de espessura, que possuem uma massa de 16,60 kg por m². Utilizou-se os valores para o FE de 9,94 kgCO₂e por m² devido a produção e armazenamento de carbono de 24,20 kgCO₂e por m².

3.5.1.1. A MITIGAÇÃO PELOS PAINÉIS MDP

Calcularam-se os efeitos da mitigação devido a utilização do MDP, considerando-se um aumento de emissões de construção pela inclusão do MDP nas obras e com o carbono armazenado nesses painéis.

Foram calculadas as emissões e o carbono armazenado para os cinco apartamentos representativos. As emissões do MDP foram somadas às emissões de construção calculadas com os FE base de 200 kgCO₂e por m² para edifícios em concreto armado e 188 kgCO₂ por m² para edifícios em alvenaria estrutural.

Com os resultados de emissões e os totais de carbono armazenado nos painéis MDP, procedeu-se o cálculo das mitigações em percentuais e por áreas dos apartamentos representativos.

3.5.1.2. IMPACTOS DOS CUSTOS DO USO DO MDP SOB OS PISOS

Procedeu-se uma análise simplificada do impacto dos aumentos de custos decorrentes da instalação dos painéis de MDP sob os pisos em áreas secas dos apartamentos representativos.

A partir do custo unitário do painel MDP, de aproximadamente R\$ 25,00 por m² (US\$ 7,50 por m²) para o material e serviços de instalação, e os custos de construção dos apartamentos a partir dos CUB relativos a estes, avaliaram-se os impactos financeiros.

Embora obviamente esta solução técnica acarrete em acréscimo de custos, a recente NBR 15575:2013, sobre desempenho de edificações, está obrigando a aplicações, nos edifícios residenciais, de soluções técnicas para melhorar o isolamento acústico. As soluções mais comuns variam do aumento da espessura da laje, a aplicação de mantas de borracha sob os contrapisos, ou a aplicação de painéis de borracha diretamente sob os pisos.

Dentro desse contexto o acréscimo do painel MDP poderia evitar a aplicação de alguma dessas técnicas, portanto um eventual aumento de custos devido a aplicação do MDP seria muito pequeno.

3.5.2. O CARBONO NAS DIVISÓRIAS DE MADEIRA TIPO *WOOD FRAME*

Outra sugestão para se ampliar o uso da madeira nas construções de edifícios residenciais convencionais (com estrutura em concreto armado), foi por meio da utilização de fechamentos de vedações internas com composições de painéis de madeira e gesso acartonado (sistemas Leves tipo *Light Wood Frame*). Divisórias internas desta tecnologia não aumentam significativamente o custo da obra e conseguem manter os desempenhos de isolamento mecânico, acústico e padrão de acabamento, que são os mais importantes para este tipo de uso.

Dentro desse contexto simulou-se a aplicação de *Wood Frame* nas paredes internas dos apartamentos de referência do tipo “A” ao tipo “D”. Para o Tipo “E” não foi estudado devido ao fato que este é construído em alvenaria estrutural, portanto não comporta o uso de divisórias leves.

Com essas simulações chegou-se a um consumo dos materiais de *Wood Frame* que armazenam carbono para os quatro apartamentos citados.

Dentro desse contexto simulou-se a aplicação das divisórias internas com esta tecnologia nas paredes internas, nos apartamentos selecionados tipo “A” ao tipo “D”.

3.5.2.1. CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO COM A RETIRADA DAS ALVENARIAS CONVENCIONAIS E INCLUSÃO DO WOOD FRAME

Diferentemente dos acabamentos analisados anteriormente (portas, pisos e forros), as paredes divisórias em *Wood Frame* estão substituindo as alvenarias internas convencionais de vedação. Portanto as emissões dos *Wood Frame* não estão contempladas dentro dos FE base estimados para construção de edifícios.

Devido a este fato tornou-se necessário subtrair as emissões de produção das alvenarias internas convencionais com tijolos cerâmicos e acrescentar as emissões de produção das paredes divisórias em *Wood Frame*. Mas como se trata de uma substituição de materiais fortemente emissores (tijolos, cimento e cal), por materiais menos emissores e que ainda estocam carbono, esperavam-se resultados favoráveis.

Obtiveram-se as emissões de construção de paredes divisórias convencionais de tijolos cerâmicos a partir do valor calculado em uma ACV brasileira sobre estes elementos construtivos, a Quantis (2012), que cita o FE de 32,12 kgCO₂e por m². Validou-se este valor com as informações utilizadas no relatório EVEN (2015).

Para obterem-se as emissões das paredes divisórias em *Wood Frame* baseou-se nos FE dos materiais e serviços usados, que foram obtidos de diversas fontes representativas. Para *Pinus* spp. serrado e tratado e painel OSB utilizou-se o FE de Ruuska (2013), para painel de gesso acartonado o FE de Ryan (2015), para pregos valor de EVEN (2012) e para os serviços de montagem valor de Costa (2012).

Salienta-se que os painéis de gesso acartonado são necessários para proporcionar um acabamento de primeira qualidade, mas representam um aumento de aproximadamente 35% nas emissões do *Wood Frame*.

Obtiveram-se as emissões de construção corrigidas dos apartamentos de referência corrigidas pelo uso de *Wood Frame*, subtraindo-se das emissões de construção calculadas com o FE base, as emissões das alvenarias convencionais e somando-se as emissões do *Wood Frame*.

3.5.2.2. A MITIGAÇÃO PELAS PAREDES DIVISÓRIAS *WOOD FRAME*

Avaliou-se a capacidade das paredes divisórias em *Wood Frame* para mitigação de parte do carbono emitido pela construção dos apartamentos, utilizando-se as emissões corrigidas calculadas para essa situação. Com estes resultados, as emissões de construção obtidas com o FE base e os totais de carbono armazenado, calculou-se a mitigação das emissões, em kgC por áreas dos apartamentos e em percentuais das emissões de construção com o FE base.

3.5.2.3. IMPACTOS DOS CUSTOS DO USO DO *WOOD FRAME*

Procedeu-se uma análise simplificada do impacto dos aumentos de custos decorrentes da substituição das alvenarias convencionais por *Wood Frame* nas paredes internas dos apartamentos representativos.

Desenvolveu-se esta análise a partir dos custos de ambos, para os materiais e mão de obra de instalação, e os custos de construção dos apartamentos a partir dos CUB relativos a estes. Com a subtração dos custos com o CUB, dos custos das alvenarias convencionais e o acréscimo dos custos do *Wood Frame*, avaliaram-se os impactos financeiros.

3.5.3. O CARBONO NAS PAREDES DE VEDAÇÃO COM BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Mais uma alternativa sugerida “não usual” foi o uso do uso de blocos vazados de matriz cimentícia com partículas de madeira, nas paredes internas dos apartamentos de referência.

Avaliaram-se as emissões de produção desses blocos, assim como o armazenamento de carbono pelas partículas de madeira e a absorção de CO₂ do ar pela cal..

3.5.3.1. AS EMISSÕES DE PRODUÇÃO DOS BLOCOS CIMENTÍCIOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Levantaram-se as emissões do bloco por meio do somatório das emissões de produção das matérias-primas, das emissões do transporte dessas até uma unidade industrial e das emissões pelo processo de fabricação do bloco.

Devido ao fato do bloco ainda não ser produzido industrialmente, não foi possível ainda se desenvolver uma ACV para ele, mas foi viável estimar-se as emissões causadas por sua produção considerando as etapas do “berço-aopartão” da indústria.

As matérias-primas mais significativas para a produção de blocos de matriz cimentícia, quanto às emissões, são o cimento Portland e a cal. Para produzir o bloco utilizou-se cimento tipo CP II-Z e cal virgem.

Utilizou-se o FE para o cimento Portland CPII-Z de 0,702 kgCO₂e por kg, obtido da ACV desenvolvida no Brasil para blocos de concreto em CBCS (2014). Para a cal virgem utilizou-se o FE de 1,184 kgCO₂e por kg para indústrias próximas a cidade do Rio de Janeiro de Costa (2012), que apresentam condições semelhantes à da Região Metropolitana de Curitiba.

Para a produção das partículas de madeira somente considerou-se as emissões da energia elétrica. As indústrias que produzem partículas de madeira utilizam para a secagem, energia térmica proveniente da queima de biomassa de origem certificada, restos da própria indústria, portanto não geram emissões significativas, conforme recomendado em Hetsch (2008). Para as emissões decorrentes da energia elétrica baseou-se em Costa (2012), sendo o FE para esta etapa estimado em 0,060 kgCO₂e por kg de partículas.

Estimaram-se as emissões de transporte das matérias-primas de seu local de produção até a indústria de produção dos blocos, considerando-se uma distância de 50 km. Esta distância é semelhante a das indústrias de blocos da região de Curitiba até as suas fontes de matérias-primas. Simulando o transporte por meio de caminhões semi-pesados, utilizando o fator de consumo de Diesel de 0,196 litros por tonelada por km de Costa (2012), e o FE de 3,3 kgCO₂e por litro de Diesel também usado em CBCS (2014), chegou-se a um FE de transporte para cada bloco cimentício com madeira de 0,0150 kgCO₂e por bloco.

Para a produção do bloco, considerando a mistura e o vibroadensamento, baseou-se nas emissões calculadas para a ACV de CBCS (2014), estimando-se o FE para esta etapa em 0,030 kgCO₂e por bloco.

3.5.3.2. O CARBONO ARMAZENADO NO BLOCO CIMENTÍCIO COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Além de conter carbono nas partículas de madeira, o bloco da pesquisa utiliza cal virgem na sua composição, este material, após a sua hidratação, durante o seu endurecimento captura CO₂ do ar.

Calculou-se o carbono armazenado na massa do bloco baseando-se nos conteúdos de madeira e cal.

Para a madeira utilizou-se o Tc de 41,0% para *Pinus* spp. citado em Oliveira *et al.* (2011), para a cal estimou-se a quantidade de carbono capturada pelos óxidos de cálcio e magnésio presentes. Portanto as mitigações são relativas ao carbono armazenado na madeira e ao CO₂ capturado pela cal.

Cada bloco contém 1,184 kg de partículas de madeira, multiplicando-se este valor pelo Tc, obteve-se o total de carbono armazenado, que foi de 0,485 kgC por bloco, que representa a não emissão, ou mitigação de 1,780 kgCO₂ por bloco.

Para estimar-se a quantidade de CO₂ que pode ser absorvida pela cal utilizou-se a Equação 1, que é uma adaptação para cales que contém magnésio, da fórmula para carbonatação de cimentos apresentada em Lagerblad (2005).

$$C_{\text{absorvido pela Cal}} = C_{\text{Cal}} \times (F_{\text{CaO}} \times M_{\text{C}} / M_{\text{CaO}} + F_{\text{MgO}} \times M_{\text{C}} / M_{\text{MgO}}) \quad (\text{kg por m}^3) \quad (1)$$

Onde:

C_{Cal} = Consumo de cal hidratada por m³ de argamassa;

F_{CaO} = A fração da massa de CaO na cal;

F_{MgO} = A fração da massa de MgO presente na cal;

M_{CaO} e M_{MgO} = massas moleculares dos óxidos (CaO=56 e MgO=40);

M_{C} = massa atômica do carbono (C=12);

Devido ao fato de que nem toda a massa de hidróxidos carbonata, utilizou-se o limite de 92% de carbonatação para óxidos hidratados sugerido em Eleni *et al.* (2014).

Estimaram-se as massas de CaO e MgO baseando-se em Mattana (2013). Desconsiderando a água presente na cal hidratada, foram observados

percentuais médios para as massas dos óxidos de 63,9% para CaO e 30,8% para MgO.

Calculando-se as emissões e o armazenamento de carbono nos blocos, procedeu-se a determinação das emissões líquidas, que é o CO₂ emitido subtraído do armazenado.

3.5.3.3. CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PELO USO DE BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Da mesma forma que as paredes divisórias *Wood Frame*, o uso dos blocos com partículas de madeira não está considerado no FE base de construção. Portanto tornou-se necessário subtrair as emissões de produção das paredes convencionais e acrescentar as emissões de produção das paredes com estes blocos. Para tanto novamente utilizou-se o valor de emissões para paredes convencionais da ACV de Quantis (2012) de 32,12 kgCO₂e por m².

Para se estimar as emissões de produção das paredes com os blocos com partículas de madeira, utilizaram-se os FE de assentamento e de revestimento da ACV de Quantis (2012). Nesse trabalho estão apresentados para o assentamento o FE de 4,30 kgCO₂ por m² de parede e para o revestimento o FE de 11,90 kgCO₂e por m² de parede.

3.5.3.4. AS MITIGAÇÕES PELOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Para avaliarem-se as mitigações de emissões devido ao uso das paredes com blocos cimentícios com partículas de madeira, utilizaram-se as emissões de construção corrigidas para este caso, calculadas para os apartamentos representativos. Com estes resultados e os totais de carbono armazenado nos blocos com partículas de madeira, procederam-se os cálculos das mitigações.

3.5.3.5. IMPACTOS DOS CUSTOS DO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Procedeu-se uma análise simplificada sobre os apartamentos representativos, do impacto dos aumentos de custos decorrentes da substituição das alvenarias convencionais paredes com os blocos com partículas de madeira.

Estimaram-se os custos de paredes produzidas com os blocos com partículas de madeira, baseando-se nos prováveis custos de produção desses, colocados em Villas Bôas (2016). Orçaram-se os custos de produção das paredes convencionais com tijolos cerâmicos e das paredes com os blocos com partículas de madeira para os materiais e mão de obra de instalação. Os custos de construção dos apartamentos foram obtidos a partir do CUB e das áreas.

Com a subtração dos custos das alvenarias convencionais e o acréscimo dos custos das paredes com blocos com partículas de madeira, avaliaram-se os impactos financeiros.

3.6. O ARMAZENAMENTO DE CARBONO NAS “COBERTURAS VERDES”

Outra forma de se armazenar carbono dentro dos edifícios residenciais é, acrescentando-se as soluções aplicadas internamente nos apartamentos, por meio da instalação de “coberturas verdes” (CV).

Avaliou-se o impacto de mitigação causado pelas CV, verificando o quanto sua implantação afeta um edifício completo, tanto em acréscimos de emissões decorrentes do reforço da estrutura para suportar as CV, quanto ao carbono armazenado nos solos orgânicos e nas vegetações.

Partindo dos resultados publicados em Freitas *et al.* (2017), estimou-se os resultados de emissões pelos reforços das estruturas, quanto do armazenamento de carbono, para edifícios simulados de doze pavimentos, com os cinco apartamentos representativos.

A altura de doze pavimentos foi escolhida para que o impacto de uma CV não seja tão grande como em um edifício de quatro, como o do estudo Freitas *et al.* (2017). Os efeitos de acréscimos de emissões devido ao reforço da estrutura em um edifício com doze pavimentos é bem menos significativo do que em um edifício de quatro.

Na Tabela 28 estão os resultados dos saldos de armazenamento de carbono por m² para as três alternativas de CV publicados em Freitas *et al.* (2017), que está no ANEXO 1. Nesse trabalho estudaram-se três tipos de CV, identificadas por CV1, CV2 e CV3, que são “coberturas verdes” com alturas de solo orgânico de 10 cm, 20 cm e 35 cm respectivamente.

TABELA 28- SALDO DO CARBONO ARMAZENADO NOS CV E ACRÉSCIMOS DE EMISSÕES

Alternativa de cobertura verde	Saldo de armazenamento de CO ₂
	(kgCO ₂ por m ² de cobertura)
CV1 – (substrato de 10 cm)	109
CV2 – (substrato de 20 cm)	220
CV3 – (substrato de 35 cm)	385

FONTE: Freitas *et al.* (2017).

Avaliaram-se os impactos das mitigações com os edifícios simulados de doze andares de cada apartamento representativo. Estimaram-se as emissões de construção pelos FE base e o carbono armazenado nas CV, considerando que estas ocupam 80% das áreas das coberturas.

3.7. EMISSÕES E ABSORÇÕES DE CO₂ PELAS ARGAMASSAS DE CAL

As argamassas de revestimento constituídas com cal e cimento Portland são amplamente utilizadas na construção civil e são grandes emissoras de CO₂ devido a estes aglomerantes. Estas argamassas têm como ponto positivo, de que após a mistura com água e a sua aplicação, os hidróxidos de cálcio e magnésio provenientes dos aglomerantes absorvem CO₂ da atmosfera.

Nos relatórios de emissões, ou nas ACV, para atender às normas internacionais NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14025:2015, recomenda-se declarar separadamente as emissões das absorções de CO₂. Ao final do documento pode ser feito um balanço, mas ambas as informações devem ser mostradas separadamente.

3.7.1. AS EMISSÕES DE CO₂ PELAS ARGAMASSAS DE CAL

A metodologia desenvolvida para as argamassas foi a de se estimar as emissões de produção com valores de FE da revisão bibliográfica e de se calcular os potenciais de absorção, baseando-se nos teores de óxidos de cálcio e magnésio presentes na cal e no cimento.

Estimou-se as emissões de produção das argamassas utilizando-se para o cimento Portland CP II-Z o FE de 0,702 kgCO₂e por kg de CBCS (2014),

para a cal hidratada o FE de 0,911 kgCO₂e por kg de Costa (2012) e para o agregado miúdo natural 0,0024 kgCO₂e por kg de Ruuska (2013).

Estimaram-se as emissões pelo transporte das matérias-primas de seu local de produção até o local de mistura com as argamassas, considerando-se a distância de 75 km (50 km das jazidas até a indústria e de 25 km da indústria até a obra, que são distâncias semelhantes as que ocorrem na região de Curitiba). Simulou-se o transporte por meio de caminhões semi-pesados, com o consumo de Diesel de 0,196 litros por tonelada por km de Costa (2012), e o FE de 3,3 kgCO₂e por litro de Diesel de CBCS (2014). Com estes valores chegou-se a um FE de 0,0225 kgCO₂e por kg de argamassa.

Para a produção das argamassas, considerou-se a mistura em betoneiras, utilizando-se o FE de 0,003 kgCO₂e por kg de argamassa de CBCS (2014).

3.7.2. AS ABSORÇÕES DE CO₂ PELAS ARGAMASSAS DE CAL

Para se estimar os potenciais de absorção de carbono pelas argamassas, utilizaram-se as equações adaptadas da fórmula apresentada em Lagerblad (2005) para concretos. As equações 2, 3 e 4 estimam a massa de carbono absorvido, para a condição de 100% dos hidróxidos carbonatados.

$$C_{\text{absorvido pelo Cimento}} = C_{CP} \times (F_{CaO} \times M_C / M_{CaO} + F_{MgO} \times M_C / M_{MgO}) \quad (\text{kg por m}^3) \quad (2)$$

$$C_{\text{absorvido pela Cal}} = C_{Cal} \times (F_{CaO} \times M_C / M_{CaO} + F_{MgO} \times M_C / M_{MgO}) \quad (\text{kg por m}^3) \quad (3)$$

$$C_{\text{absorvido pela Argamassa}} = C_{\text{absorvido pelo Cimento}} + C_{\text{absorvido pela Cal}} \quad (\text{kg por m}^3) \quad (4)$$

Onde:

C_{CP} = Consumo de cimento Portland por m³ de argamassa;

C_{Cal} = Consumo de cal hidratada por m³ de argamassa;

F_{CaO} = A fração da massa de CaO presente no cimento ou na cal hidratada;

F_{MgO} = A fração da massa de MgO presente no cimento ou na cal hidratada;

M_{CaO} e M_{MgO} = massas moleculares dos óxidos (CaO=56 e MgO=40);

M_C = massa atômica do carbono (C=12);

Portanto: $M_C / M_{CaO} = 12/56 = 0,214$ e $M_C / M_{MgO} = 12/40 = 0,300$

Para o cimento CP II-Z considerou-se a fração de CaO de 0,49; baseando-se na fração de CaO para o clínquer de 0,645 de Mehta e Monteiro (2006), e nas proporções de 14% de pozzolanas e 10% de material carbonático

que são os limites para o CP II-Z da NBR 5732:1991. Considerou-se a fração de MgO para o cimento no limite máximo de 0,065 também da NBR 5732:1991.

Para a cal considerou-se as frações dos óxidos pelos valores médios obtidos em Mattana (2013), adaptando-se as frações para cal hidratada em 0,459 para CaO e 0,076 para MgO. Considerou-se também o limite de carbonatação de 92% do potencial total colocado em Eleni *et al.* (2014).

3.7.3. O PROGRAMA EXPERIMENTAL COM AS ARGAMASSAS DE CAL

Verificaram-se os valores dos potenciais de absorção das argamassas, aplicando-se um programa experimental com duração de dois anos, onde mediram-se as quantidades de CO₂ absorvidas em pelas argamassas.

Para este programa definiram-se três traços diferentes de argamassas, com proporções 1:1:6; 1:3:7,5 e 1:2:9. Utilizaram-se como aglomerantes a cal Hidratada CH II e cimento Portland CP II-Z 32.

Definiram-se esses traços pelo fato se serem usuais para revestimentos e possuírem quantidades bem diferentes dos dois aglomerantes, condição que facilita a identificação da absorção de CO₂ pelos aglomerantes de forma separada.

Co estes traços revestiu-se tijolos cerâmicos vazados com dimensões de 19x19x13cm, com os três traços de argamassas em uma única camada com três centímetros de espessura, como mostra a Figura 19.

FIGURA 19 - OS TIJOLOS CERÂMICOS REVESTIDOS COM ARGAMASSA



FONTE: O Autor (2017).

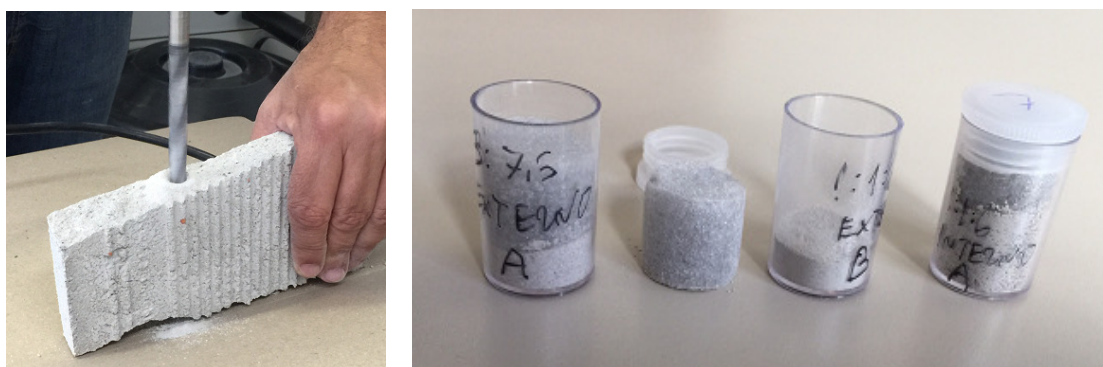
Simulando-se a realidade das diferentes condições ambientais, metade dos tijolos foi armazenada em ambiente interno e metade em ambiente externo, expostos às intempéries.

Complementarmente, para possibilitar-se verificar as quantidades de carbono absorvidas por massa e volume, executaram-se ensaios físicos de densidade e absorção de água sobre corpos de prova.

Nas idades de 28, 90, 180, 365 e 730 dias extraíram-se amostras de argamassas em três níveis dos revestimentos. Na superfície externa, no interior a aproximadamente 1,5 cm de profundidade e na interface interna de aderência com o tijolo, identificou-se essas amostras como “A”, “B” e “C” respectivamente.

Entre os instantes da extração e o momento da análise do teor de carbono, para minimizar ao máximo o contato com a atmosfera, as amostras foram mantidas isoladas dentro de potes plásticos lacrados e preenchidas com tarugos de espuma de polietileno, praticamente eliminando o conteúdo de ar livre dentro dos potes. Na Figura 20 estão mostradas a extração de uma amostra da camada “b” do revestimento de argamassa (depois de separado do tijolo) e os potes de acondicionamento.

FIGURA 20 – EXTRAÇÃO DE AMOSTRA DA CAMADA “B” E OS POTES DE ACONDICIONAMENTO ATÉ O MOMENTO DA ANÁLISE



FONTE: O Autor (2017).

Analisaram-se cinco subamostras de cada amostra, quando utilizado o analisador LECO e duas subamostras quando utilizado o analisador Vario EL III. Aplicaram-se sobre os valores tratamento estatísticos para eliminar valores espúrios, (valores diferentes em mais de três vezes o desvio padrão das médias), provavelmente decorrentes de erros ou problemas de contaminação,

ressaltando-se que são amostras muito pequenas que são levadas aos analisadores químicos.

Com os resultados aos 730 dias dos Tc estatisticamente tratados, calcularam-se os percentuais de carbonatação alcançados e verificaram-se, em relação aos potenciais totais de absorção, a validade do limite de 92% de carbonatação dos hidróxidos da cal citado em Eleni *et al.* (2014).

3.7.4. OS ERROS AO SE CONSIDERAR AS EMISSÕES LÍQUIDAS DAS ARGAMASSAS

Para se verificar a grandeza dos erros que incorrem um relatório de emissões ou uma ACV que considere diretamente as emissões líquidas de CO₂ das argamassas, ou as emissões subtraídas das absorções, procedeu-se um estudo com os volumes de argamassas aplicados nos apartamentos de referência.

Avaliaram-se as emissões pelas construções dos apartamentos com os FE base, com e sem descontar as absorções de CO₂ pelas argamassas. Com esses resultados determinou-se os erros percentuais decorrentes do não desconto das absorções.

4. RESULTADOS

A seguir estão apresentados os resultados das ações descritas no capítulo de materiais e métodos desse trabalho.

4.1. AS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO PARA EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Seguindo as colocações da metodologia para se estimar as emissões de construção de edifícios residenciais, procedeu-se a análise de diversos documentos, conforme se coloca a seguir.

Analisando todos os resultados coletados nas publicações, encontraram-se valores de FE para edifícios residenciais de 145 a 404 kgCO₂e por m².

Observaram-se o resultado par um edifício em Frankfurt com FE de 194 kgCO₂e por m² (ENSLIC BUILDING, 2010b), o resultado de FE de 205,7 kgCO₂e por m² (FREITAS, PARCHEN e PARCHEN, 2010), de FE de 224 kgCO₂e por m² (STACHERA E CASAGRANDE, 2008).

Descartaram-se os valores dos FE dos edifícios em Zaragoza, com FE de 395 e 404 kgCO₂e por m² (ENSLIC BUILDING, 2010a), que parecem ser casos extremos provavelmente devido a particularidades locais. Da mesma observou-se que os valores da grande incorporadora brasileira são fruto de aperfeiçoamentos dos processos construtivos desde 2010, cujos resultados atuais para os FE são de 145 kgCO₂e por m² para edifícios em concreto armado e 154 kgCO₂e por m² para edifícios em alvenaria estrutural.

Com essas considerações concluiu-se que como linha de base para valores de FE de obras de edifícios residenciais no Brasil uma faixa de valores entre 180 a 200 kgCO₂e por m² seria bastante realista. Também se observou que as emissões para edificações erguidas em alvenaria estrutural em relação às construídas em concreto armado, são menores em valores da ordem de 6%.

Seguindo essas colocações, adotou-se os valores de 200 kgCO₂e por m² como FE base de edifícios residenciais construídos em concreto armado e 6% a menos e 188 kgCO₂e por m² como FE base de edifícios residenciais construídos em alvenaria estrutural.

Utilizaram-se esses valores como referências para calcular-se os percentuais de mitigações que se alcançou com o carbono estocado nos materiais de e com madeira.

4.2. AS MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Obtiveram-se os resultados dos Tc seguindo os procedimentos colocados na metodologia, utilizando-se os equipamentos analisadores químicos de Tc. Procederam-se as análises das cinco subamostras de cada produto seguidas das análises estatísticas (média, desvio padrão e coeficiente de variação em percentagem, verificação de homogeneidade).

Por meio do teste não paramétrico de *Shapiro-Wilk* (SW), verificou-se que os resultados atenderam as exigências da ANOVA de normalidade dos dados (alfa = 5%). Com o Teste de *Tukey* (de 5% de probabilidade) concluiu-se que as médias dos resultados não diferem estatisticamente entre si.

Transformaram-se as massas de carbono em CO₂ multiplicando-se os valores por 3,67. Na Tabela 29 estão apresentados os resultados das massas de carbono para as folhas de portas internas, na Tabela 30 estão os resultados obtidos para os batentes e alizares que formam os conjuntos das portas.

TABELA 29 – O CARBONO ARMAZENADO NAS FOLHAS DE PORTAS

Material	Dimensões (mm)	Massa (kg)	Tc (%)	Carbono (kgC/peça)
Folha de porta com núcleo de MDP	35x0600x2100	18,099	43,82	7,93
	35x0700x2100	21,116		9,25
	35x0800x2100	24,132		10,57
	35x1200x2100	36,199		15,86
	35x1400x2100	42,232		18,51
Folha de porta com núcleo em sarrafos de <i>Pinus</i> spp.	35x0600x2100	14,409	44,06	6,35
	35x0700x2100	16,810		7,42
	35x0800x2100	19,212		8,46
	35x1200x2100	28,817		12,70
	35x1400x2100	33,620		14,81

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 30 – O CARBONO ARMAZENADO NOS BATENTES E ALIZARES

Material	Vão da porta (mm)	Dimensões (mm)	Massa (kg)	Tc (%)	Carbono (kgC/peça)
Batente em EGP de <i>Pinus</i> spp.	600	Seção x 4.868	12,59	44,19	5,56
	700	Seção x 4.968	12,84		5,67
	800	Seção x 5.068	13,10		5,79
	1200	Seção x 5.468	14,13		6,24
	1400	Seção x 5.668	14,65		6,47
Batente maciço em <i>Eucaliptus</i>	600	Seção x 4.880	17,32	44,60	7,73
	700	Seção x 4.980	17,68		7,89
	800	Seção x 5.080	18,03		8,04
	1200	Seção x 5.480	19,45		8,68
	1400	Seção x 5.680	20,16		8,99
Alizares em EGP de <i>Pinus</i> spp.	600	Seção x 10.016	5,41	44,24	2,39
	700	Seção x 10.216	5,52		2,44
	800	Seção x 10.416	5,62		2,49
	1200	Seção x 11.216	6,06		2,68
	1400	Seção x 11.616	6,27		2,78
Alizares maciços em <i>Eucaliptus</i>	600	Seção x 10.040	4,42	44,60	1,97
	700	Seção x 10.240	4,51		2,01
	800	Seção x 10.440	4,60		2,05
	1200	Seção x 11.240	4,95		2,21
	1400	Seção x 11.640	5,12		2,28

FONTE: O Autor (2017).

Na Tabela 31 estão os valores para os materiais utilizados nas paredes divisórias *Wood Frame*, nos blocos de concreto com partículas de madeira pesquisadas na UFPR com informações publicadas em Villas Bôas (2016) e nos solos orgânicos utilizados nas “coberturas verdes”.

Na Tabela 32 estão mostrados os resultados para os materiais utilizados nas paredes divisórias e os solos orgânicos utilizados nas “coberturas verdes”.

TABELA 31 – O CARBONO ARMAZENADO NOS PISOS, RODAPÉS E FORROS

Material	Espessura (mm)	Tc (%)	Massa (kg por m²)	Carbono (kgC por m²)
Piso laminado AC4	07	49,18	6,07	2,99
Piso laminado AC3	07	49,94	5,90	2,95
Piso maciço de Ipê	17	46,35	18,32	8,49
Piso maciço de Jatobá	17	43,52	16,31	7,10
Material	Seção (mm)	Tc (%)	Massa (kg por m)	Carbono (kgC por m)
Rodapé HDF	20 x 70	51,76	0,39	0,202
Rodapé HDF	18 x 80	51,77	0,37	0,192
Rodapé Ipê	20 x 80	46,35	0,73	0,338
Rodapé Jatobá	20 x 80	43,52	0,63	0,274
Material	Seção (mm)	Tc (%)	Massa (kg por m²)	Carbono (kgC por m²)
Forro de jatobá	12	43,52	11,52	5,01
Forro de cedrinho	12	44,20	8,72	3,86
Estrutura para forro em cedrinho	-	44,20	2,80	1,24

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 32 – O CARBONO NOS MATERIAIS PARA PAREDES DIVISÓRIAS E SOLOS ORGÂNICOS

Material	Unidade	Tc (%)	Massa (kg por unidade)	Carbono (kg por unidade)
(<i>Pinus</i> spp. Tratado	m ³	44,26	560,48	248,07
Painel OSB (10 mm)	m ²	44,12	6,46	2,850
P. gesso acartonado (12,5mm)*	m ²	1,87	8,82	0,165
Bloco cimentício com madeira**	Bl.14x19x39cm	10,5	4,64	0,485
Solo orgânico	m ³	30,24	1010,2	305,48

* O painel de gesso acartonado armazena carbono no papelão das faces.

** Valores retirados do APÊNDICE 1

FONTE: O Autor (2017).

Comparando-se os resultados obtidos, verificou-se que para os pisos laminados, o resultado obtido de 3,21 kgC por m² (ou 11,77 kgCO₂ por m²) é compatível com os valores encontrados na EPD-EHW-2008221-E, 2,80 kgC por m² (ou 10,28 gCO₂ por m²) publicado em Bossenmayer (2011), e na EPD-EPL-20150021-CBE1-EN, de 3,81 kgC por m² (ou 14,00 kgCO₂ por m²) publicado

em Bossenmayer (2015a), ambas EPD de pisos laminados com espessura de 7 mm.

Para as portas semi-ocas completas estudadas obteve-se resultados de armazenamento de carbono, para portas de 80 cm, de 10,57 kgC (ou 38,75 kgCO₂) e para a porta com núcleo de MDP e 8,46 kgC (ou 31,05 KgCO₂) para a porta com núcleo sarrafeado. Que são valores compatíveis com os obtidos no estudo de Bergman *et al.* (2014), também para portas de 80 cm., de 12,47 kgC (ou 45,77 kgCO₂) armazenados em uma porta de madeira sólida.

O resultado obtido para TC de *Pinus* spp. tratado foi de 44,26%, ou 248,07 kgC por m³. Em Oliveira *et al.* (2011) foi encontrado o valor semelhante de Tc para *Pinus* spp. não tratado de 41,0%.

Verificando o resultado obtido para painéis OSB de 10 mm de espessura, de Tc de 44,12%, que representa 2,85 kgC por m² (10,45 kgCO₂ por m²), ou 284,59 kgC por m³ (1.044,4 kgCO₂ por m³), observou-se que esse último valor que é semelhante ao de 1.015,0 kgCO₂ por m³ encontrado em Bossenmayer (2012a).

Não foram encontrados nas EPD de painéis de gesso acartonado valores de carbono armazenado.

4.2.1. O CARBONO ARMAZENADO E OS CENÁRIOS DE QUALIDADES DE ACABAMENTOS DOS MATERIAIS “USUAIS”

As Tabelas 33 e 34 mostram os totais de carbono armazenado, por conjunto de porta (folhas, marcos e alizares), por unidades de área (pisos e forros) e por comprimento (rodapés), para cada um dos cenários de acabamentos montados.

Para os pisos laminados, visando obter um valor representativo do carbono armazenado, utilizou-se a média dos resultados para pisos com superfície AC3 e AC4. Para os rodapés utilizou-se uma média dos resultados obtidos para os modelos mais comuns, com dimensões de 20 x 70 mm e 18 x 80 mm.

TABELA 33 – CARBONO ARMAZENADO NOS CENÁRIOS PARA OS CONJUNTOS DE PORTAS COMPLETOS

CONJUNTOS DAS PORTAS	Dimensões (mm)	Massa de carbono (kgC)
Cenário 1: Porta de núcleo MDP + marco e alizar de <i>Eucalyptus</i>	35x0600x2100	17,63
	35x0700x2100	19,15
	35x0800x2100	20,67
	35x1200x2100	26,75
	35x1400x2100	29,78
Cenário 2: Porta de núcleo sarrafeado + marco <i>Pinus</i> spp. e alizar de EGP de <i>Pinus</i> spp	35x0600x2100	14,30
	35x0700x2100	15,52
	35x0800x2100	16,74
	35x1200x2100	21,62
	35x1400x2100	24,06

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 34 – CARBONO ARMAZENADO NOS CENÁRIOS PARA OS PISOS E RODAPÉS

PISOS	Unidades	Massa de carbono (kgC)
Cenário 1: Ipê 17 mm	m ²	8,49
Cenário 2: Laminado (média AC3 e AC4) 7 mm	m ²	2,97
RODAPÉS		
Cenário 1: Ipê 20 x 80 mm	m	0,34
Cenário 2: HDF (média de 20x70 e 18x80 mm)	m	0,20
FORROS		
Cenários 1 e 2: Jatobá 12 mm de espessura com estrutura em cedrinho	m ²	6,25

FONTE: O Autor (2017).

4.3. OS MATERIAIS QUE ARMAZENAM CARBONO NOS APARTAMENTOS REPRESENTATIVOS

Dando continuidade a metodologia, inicialmente levantaram-se as quantidades dos materiais de madeira “usuais” aplicados nos apartamentos do conjunto representativo.

Nas plantas dos apartamentos, apresentadas no APÊNDICE 1, são identificáveis as portas e os cômodos com pisos de madeira. Os forros de madeira foram considerados com uso somente nas sacadas. Na Tabela 35 estão apresentadas as quantidades dos materiais “usuais” nos apartamentos do conjunto representativo. Na Tabela 36 estão apresentadas as áreas de

aplicação dos materiais “não usuais” sugeridos que podem ser aplicados nos apartamentos do conjunto representativo, assim como as áreas e volumes de argamassas utilizados.

TABELA 35 - OS APARTAMENTOS E QUANTIDADES DOS MATERIAIS “USUAIS”

Aptos	Materiais “usuais” que armazenam carbono								
	Área (m ²)	Piso (m ²)	Rodapé (m)	Forro (m ²)	Portas: 210 x largura (cm)				
					60	70	80	120	140
A	476,3	104,4	207,4	179,7	11	16	-	1	1
B	222,7	102,9	90,9	36,8	7	8	1	1	-
C	118,1	54,4	69,9	27,0	5	5	3	-	-
D	89,0	46,1	52,8	13,9	2	3	1	-	-
E	61,5	34,1	45,2	3,0	2	3	1	-	-

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 36 - OS APARTAMENTOS E ÁREAS DE APLICAÇÕES DOS MATERIAIS “NÃO USUAIS” E DE ARGAMASSAS

Aptos	Materiais “não usuais”		Argamassas	
	MDP sob os pisos (m ²)	Paredes Wood Frame ou blocos com madeira (m ²)	Área revestida (m ²)	Volumes (m ³)
A	104,4	246,3	1.495,0	29,9
B	102,9	137,3	648,0	13,0
C	54,4	96,8	372,0	7,4
D	46,1	69,0	281,0	5,6
E	34,1	-	196,0	2,9

FONTE: O Autor (2017).

4.4. O CARBONO PRESENTE NOS PRODUTOS “USUAIS” DE MADEIRA

Como estes materiais já são aplicados normalmente nos processos construtivos dos apartamentos, para estes não se calculou as suas emissões, presume-se que elas já estão dentro do FE de construção, somente foram calculadas as massas de carbono que estes materiais armazenam.

Com as quantidades dos materiais “usuais” que são aplicados nos apartamentos do conjunto representativo e as massas de carbono em cada produto, montaram-se as Tabelas de 37 a 41. Nessas estão apresentados os valores totais das massas carbono armazenado nos materiais usuais (portas, pisos e forros) dos cinco apartamentos representativos.

TABELA 37 – MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “A”

Apartamento “A” (476,30 m²)			<i>Cenário 1 de acabamento</i>
Material	Qtd.	Unidade	Massa de Carbono (kgC)
Piso	104,4	m ²	886,75
Rodapé	207,4	m	70,17
Forro	179,7	m ²	1.123,08
Cj. porta 60	11	unidade	193,93
Cj. porta 70	16	unidade	306,40
Cj. porta 120	1	unidade	26,75
Cj. porta 140	1	unidade	29,78
Total			2.636,86 kgC

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 38 - MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “B”

Apartamento “B” (222,71 m²)			<i>Cenário 1 de acabamento</i>
Material	Qtd.	Unidade	Massa de Carbono (kgC)
Piso	102,9	m ²	873,76
Rodapé	90,9	m	30,76
Forro	36,8	m ²	229,68
Cj. porta 60	7	unidade	123,41
Cj. porta 70	8	unidade	153,20
Cj. porta 80	1	unidade	20,66
Cj. porta 120	1	unidade	26,75
Total			1.458,21 kgC

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 39 - MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “C”

Apartamento “C” (118,08 m ²)			<i>Cenário 2 de acabamento</i>
Material	Qtd.	Unidade	Massa de Carbono (kgC)
Piso	54,4	m ²	161,34
Rodapé	69,9	m	13,75
Forro	27	m ²	168,74
Cj. porta 60	5	unidade	71,50
Cj. porta 70	5	unidade	77,65
Cj. porta 80	3	unidade	50,22
Total			543,20 kgC

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 40 - MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “D”.

Apartamento “D” (89,00 m ²)			<i>Cenário 2 de acabamento</i>
Material	Qtd.	Unidade	Massa de Carbono (kgC)
Piso	46,1	m ²	136,73
Rodapé	52,8	m	10,39
Forro	13,9	m ²	86,87
Cj. porta 60	2	unidade	28,60
Cj. porta 70	3	unidade	46,59
Cj. porta 80	1	unidade	16,74
Total			325,91 kgC

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 41 - MASSAS DE CARBONO NOS MATERIAIS “USUAIS” DO APARTAMENTO “E”

Apartamento “E” (61,54 m ²)			<i>Cenário 2 de acabamento</i>
Material	Qtd.	Unidade	Massa de Carbono (kgC)
Piso	34,1	m ²	101,14
Rodapé	45,2	m	8,89
Forro	3,0	m ²	18,69
Cj. porta 60	2	unidade	28,60
Cj. porta 70	3	unidade	46,59
Cj. porta 80	1	unidade	16,74
Total			220,63 kgC

FONTE: O Autor (2017).

4.5. AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NOS PRODUTOS “NÃO USUAIS”

Como estes materiais não são aplicados normalmente nos processos construtivos dos apartamentos, para estes calcularam-se as suas emissões e as massas de carbono armazenadas.

A seguir estão os resultados das emissões e do carbono armazenado nos apartamentos do conjunto representativo, nos produtos “não usuais”.

4.5.1. AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NO MDP SOB OS PISOS

Seguindo a metodologia, com os valores para MDP com 25 mm de espessura de FE de 9,94 kgCO₂e por m² para a produção e de 24,20 kgCO₂e por m² de armazenamento de carbono de WOODSOLUTIONS (2015), montou-se a Tabela 42. Essa tabela apresenta os valores de emissões da produção do MDP e o carbono armazenado neste material, nas quantidades aplicadas nos apartamentos representativos.

TABELA 42 – EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NO MDP NOS PISOS

Apto.	Área (m²)	Área de MDP (m²)	Emissões do MDP (kgCO₂e)	Armazenamento MDP (kgCO₂)
A	476,3	104,43	1.038	2.527
B	222,7	102,9	1.023	2.490
C	118,1	54,4	541	1.316
D	89,0	46,1	458	1.116
E	61,5	34,1	339	825

FONTE: O Autor (2017).

4.5.2. AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO DEVIDO AO USO DAS PAREDES DIVISÓRIAS *WOOD FRAME*

A partir das áreas das paredes divisórias internas dos apartamentos de representativos, aplicando-se o *Wood Frame* como citado na metodologia, chegou-se aos consumos dos materiais dessas paredes divisórias que armazenam carbono. Esses valores estão apresentados na Tabela 43.

TABELA 43 - QUANTIDADES DOS MATERIAIS NAS PAREDES DIVISÓRIAS *WOOD FRAME*

Ap.	<i>Divisórias internas</i> (m ²)	<i>Pinus spp.</i> (m ³)	Painel OSB (m ²)	<i>Painel gesso acartonado</i> (m ²)
A	246,3	3,8	492,6	492,6
B	137,3	2,1	274,5	274,5
C	96,8	1,5	193,5	193,5
D	69,0	1,1	138,0	138,0

FONTE: O Autor (2017).

Estimou-se as emissões das paredes divisórias *Wood Frame*, utilizando o FE de 180 kgCO₂e por m³ para *Pinus spp.* serrado e tratado e FE de 2,08 kgCO₂e por m² para painel OSB, ambos constantes em Ruuska (2013). Também se utilizaram o FE de 2,11 kgCO₂e por m² para painel de gesso acartonado apresentado em Ryan (2015), o FE de 1,45 kgCO₂e por kg para os pregos constante em EVEN (2012) e o FE de 0,06 kgCO₂e por m² para os serviços de montagem, baseando-se em Costa (2012).

Procedendo-se as quantidades dos materiais utilizadas em cada apartamento de referência nas *Wood Frame*, multiplicados pelos respectivos FE, obtiveram-se estimativas das emissões, que estão apresentadas na Tabela 44.

TABELA 44 - EMISSÕES DAS PAREDES DIVISÓRIAS *WOOD FRAME*

Emissões dos materiais e paredes <i>Wood Frame</i>						
Ap.	<i>Pinus tratado</i>	P. OSB	P. Gesso	Pregos e parafusos	Montagem	Total
(kgCO ₂ e)						
A	688,4	1.024,6	1.039,4	8,9	14,8	2.776
B	383,6	571,0	579,2	5,0	8,2	1.547
C	270,4	402,5	408,3	3,5	5,8	1.090
D	192,9	287,0	291,2	2,5	4,1	778

FONTE: O Autor (2017).

Com as quantidades dos materiais mostradas na Tabela 43 e as massas de carbono armazenadas por unidades, que foram medidas no programa experimental, (248,07 kgCO₂ por m³ de *Pinus tratado*, 2,85 kgCO₂ por m² de painel OSB e 0,16 kgCO₂ por m² de painel de gesso acartonado), montou-se a

Tabela 45 que contém as massas de carbono armazenadas por material do *Wood Frame* por apartamento representativo.

TABELA 45. CARBONO ARMAZENADO NAS PAREDES DIVISÓRIAS *WOOD FRAME*

Ap.	<i>Pinus spp.</i> (kgC)	Painel OSB (kgC)	<i>Painel gesso acartonado</i> (kgC)	Total (kgC)
A	948,7	1.404,0	81,2	2.434
B	528,7	782,4	45,3	1.356
C	372,7	551,5	31,9	956
D	265,8	393,3	22,8	682

FONTE: O Autor (2017).

4.5.3. AS EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO DEVIDO AO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

A partir das referências bibliográficas citadas na metodologia, obtiveram-se as emissões relativas às matérias-primas e as etapas da produção dos blocos cimentícios com partículas de madeira. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 46. Ao final desta tabela está o somatório, que representa o FE de produção por unidade de bloco com partículas de madeira.

TABELA 46 - MATÉRIAS-PRIMAS E EMISSÕES POR BLOCO COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Bloco (14 x 19 x 39 cm)	Consumo por bloco	FE (kgCO ₂ e por kg)	FE por bloco (kgCO ₂ e)	%
Cimento CP II Z	2,264 kg	0,702	1,589	78,7
Cal virgem	0,265 kg	1,184	0,314	15,5
Partículas <i>Pinus spp</i>	1,184 kg	0,060	0,071	3,5
Água	1,372 kg	-	-	-
Transporte MP	1 ud.	0,015	0,015	0,7
Proc. de produção	1 ud.	0,030	0,030	1,5
FE por bloco (kgCO₂e):			2,019	100

FONTE: O Autor (2017).

Seguindo a metodologia, calcularam-se as quantidades de carbono armazenadas pela madeira e a cal, que estão apresentados na Tabela 47. Nessa tabela estão os valores por bloco e por conjunto de 12,5 blocos, que é a quantidade utilizada em um m² de parede. É interessante observar que as partículas de madeira representam quase 90% do total do carbono

armazenado. O valor relativo à madeira já é o do carbono transformado em dióxido de carbono (massa x 3,67).

TABELA 47 - ARMAZENAMENTO E CAPTURA DE CO₂ PARA OS BLOCOS

Armazenamento de CO₂	(kgCO ₂ por bloco)	(kgCO ₂ por m ² de parede)	%
CO ₂ armazenado na madeira	1,782	22,270	89,7
CO ₂ capturado pela cal	0,205	2,565	10,3
Total	1,987	24,834	100

FONTE: O Autor (2017).

Calculadas as emissões e o armazenamento de carbono, procedeu-se a determinação das emissões líquidas, que é o CO₂ emitido subtraído do carbono armazenado. Os valores das emissões, do armazenamento e as emissões líquidas estão apresentados na Tabela 48.

TABELA 48 – EMISSÕES LÍQUIDAS DOS BLOCOS

Emissões e armazenamento	Por bloco	Por m ² de parede
Emissões (kgCO ₂ e)	2,019	25,239
Armazenamento (kgCO ₂)	1,987	24,834
Emissões líquidas (kgCO₂e)	0,032	0,405

FONTE: O Autor (2017).

Com o FE dos blocos de 25,250 kgCO₂e por m² de parede, as emissões de assentamento de 4,30 kgCO₂e por m² e as emissões de revestimento de 11,90 kgCO₂e por m², calculou-se o FE de construção das paredes de blocos de concreto com partículas de madeira em 41,45 kgCO₂e por m² de parede.

Com essas informações montou-se a Tabela 49, que contém as áreas das paredes divisórias de blocos com partículas de madeira, as emissões provenientes da produção e o carbono armazenado desses blocos.

TABELA 49 - EMISSÕES E ARMAZENAMENTO PELAS PAREDES DIVISÓRIAS DE BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Ap.	<i>Divisórias Internas</i> (m²)	<i>Blocos com partículas de madeira</i>	
		Emissões (kgCO₂e)	Armazenamento (kgCO₂)
A	246,3	6.216	6.117
B	137,3	3.464	3.409
C	96,8	2.442	2.403
D	69,0	1.741	1.714

FONTE: O Autor (2017).

4.6. AS CORREÇÕES DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO DEVIDO AO USO DOS MATERIAIS “NÃO USUAIS” NAS PAREDES INTERNAS

Para a substituição das paredes convencionais pelas divisórias em *Wood Frame*, ou pelas paredes com blocos cimentícios com partículas de madeira, necessitou-se corrigir as emissões obtidas com o FE base, retirando-se dessas as emissões das paredes convencionais. Estimaram-se as emissões de construção das divisórias internas convencionais utilizando-se o FE de 32,12 kgCO₂e por m² da ACV de Quantis (2012) para paredes em tijolos cerâmicos revestidas com argamassa. Verificou-se a validade desta informação observando que as emissões dessas paredes representam cerca de 10% das emissões de construção de edifício residencial, como citado em EVEN (2015), valor que corresponde ao calculado, utilizando-se as áreas de paredes dos apartamentos de referência.

O apartamento tipo “E” não foi considerado novamente pelo fato do mesmo ser construído em alvenaria estrutural, que não comporta paredes com os blocos com partículas de madeira.

4.6.1. CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO COM A RETIRADA DAS ALVENARIAS CONVENCIONAIS E INCLUSÃO DAS *WOOD FRAME*

Subtraindo-se das emissões obtidas com o FE base, as emissões das alvenarias convencionais e somando-se as emissões das divisórias em *Wood Frame*, obtiveram-se as emissões corrigidas para este caso, que estão apresentadas na Tabela 50.

TABELA 50 - EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO CORRIGIDAS DEVIDO AO USO DE *WOOD FRAME*

Ap.	Emissões de construção		Emissões de		Emissões de construção Corrigidas (kgCO ₂ e)
	FE (kgCO ₂ e por m ²)	Total (kgCO ₂ e)	Alvenaria de tijolos (kgCO ₂ e)	Divisórias <i>Wood Frame</i> (kgCO ₂ e)	
A	200	95.260	7.911	2.776	90.125
B	200	44.542	4.408	1.547	41.681
C	200	23.616	3.108	1.090	21.599
D	200	17.800	2.216	778	16.361

FONTE: O Autor (2017).

4.6.2. CORREÇÃO DAS EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO COM A RETIRADA DAS ALVENARIAS CONVENCIONAIS E INCLUSÃO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Emissões de construção foram corrigidas para este caso, subtraindo-se as emissões das alvenarias de tijolos das emissões calculadas com FE base e somando-se as emissões das paredes com blocos cimentícios com partículas de madeira. As emissões totais corrigidas estão apresentadas na Tabela 51.

TABELA 51 - EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO CORRIGIDAS COM O USO DE BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Ap.	Emissões de construção		Emissões de alvenarias		Emissões de construção corrigidas (kgCO ₂ e)
	FE (kgCO ₂ e por m ²)	Total (kgCO ₂ e)	Com tijolos cerâmicos (kgCO ₂ e)	Com blocos com partículas de madeira (kgCO ₂ e)	
A	200	95.260	7.911	10.206	97.555
B	200	44.542	4.408	5.688	45.821
C	200	23.616	3.108	4.009	24.518
D	200	17.800	2.216	2.859	18.443

FONTE: O Autor (2017).

4.7. AS MITIGAÇÕES DE EMISSÕES PELOS MATERIAIS APLICADOS INTERNAMENTE NOS APARTAMENTOS

A seguir estão apresentadas as mitigações obtidas pelos materiais de e com madeira aplicados nos edifícios residenciais. Neste item também se procedeu a análises simplificadas sobre os impactos dos custos das aplicações dos materiais “não usuais”.

4.7.1. A MITIGAÇÃO PELOS MATERIAIS “USUAIS”

Iniciando-se pelos materiais “usuais”, montou-se a Tabela 52, que contém os valores das massas de carbono armazenadas nesses e das mitigações de emissões relativas a esses. Estão apresentados os valores em kg por m² de área dos apartamentos e em percentual das emissões de construção obtidas com os FE base.

TABELA 52 – A MITIGAÇÃO PELOS MATERIAIS “USUAIS” DE MADEIRA

Apartamento	Armazenamento		Emissões de construção		Mitigação	
	Carbono (kgC)	CO ₂ (kgCO ₂)	FE (kgCO ₂ e por m ²)	Total (kgCO ₂ e)	(%)	(kgCO ₂ por m ²)
A <i>Cenário 1</i>	2.637	9.677	200	95.260	10,2	20,3
B <i>Cenário 1</i>	1.458	5.352	200	44.542	12,0	24,0
C <i>Cenário 2</i>	543	1.994	200	23.616	8,4	16,9
D <i>Cenário 2</i>	326	1.196	200	17.800	6,7	13,4
E <i>Cenário 2</i>	221	810	188	11.570	7,0	13,2
Médias					8,9	17,6

FONTE: O Autor (2017).

4.7.2. A MITIGAÇÃO PELOS MDP NOS PISOS

Com os valores relativos ao MDP montou-se a Tabela 53, que contém os as mitigações de emissões, que foram calculadas conforme definido na metodologia. Estão apresentadas as emissões de construção corrigidas e os valores das mitigações de emissões devidos ao uso do MDP. Estão também apresentados os valores das mitigações em kg por m² de área dos apartamentos e em percentual das emissões de construção obtidas com os FE base.

TABELA 53 – EMISSÕES E O CARBONO ARMAZENADO NO MDP NOS PISOS

Apto.	Área MDP (m ²)	Armazenamento		Emissões de construção FE base+ MDP (kgCO ₂ e)	Mitigação por apartamento	
		Carbono (kgC)	CO ₂ (kgCO ₂)		(%)	(kgCO ₂ por m ²)
A	104,4	689	2.527	96.298	2,7	5,3
B	102,9	679	2.490	45.565	5,6	11,2
C	54,4	359	1.316	24.157	5,6	11,1
D	46,1	304	1.116	18.258	6,3	12,5
E	34,1	225	825	11.908	7,1	13,4
Médias					5,4	10,7

FONTE: O Autor (2017).

4.7.2.1. O IMPACTO DOS CUSTOS PELO USO DO MDP SOB OS PISOS

Considerando um custo do MDP aplicado nos pisos dos apartamentos e os custos de construção dos apartamentos a partir dos CUB, verificou-se que a instalação do MDP provoca um aumento de custos para as obras da ordem de 1,3 a 1,5%.

4.7.3. A MITIGAÇÃO PELOS WOOD FRAME NAS PAREDES INTERNAS

É importante observar esse caso trata-se de uma substituição de um item bastante emissor por outro que é menos emissor e que ainda armazena carbono, portanto as mitigações têm duas origens.

Para o uso de *Wood Frame*, procedem-se cálculos com as emissões de construção obtidas com o FE base, as emissões de construção corrigidas para este caso e os totais de carbono armazenado. Calcularam-se as mitigações, em kgC por áreas dos apartamentos e em percentuais das emissões de construção com o FE base. A Tabela 54 apresenta estes valores de mitigações. Observar que os valores de mitigações por m² referem-se às áreas dos apartamentos e não as áreas de *Wood Frame*.

TABELA 54 – AS MITIGAÇÕES DE EMISSÕES DEVIDO AO *WOOD FRAME*

Efeitos do uso de <i>Wood Frame</i>							
Ap.	Armazenamento		Emissões			Mitigações	
	Carbono (kgC)	CO ₂ (kgCO ₂)	FE base (kgCO ₂ e)	Corrigidas (kgCO ₂ e)	Após mitigação (kgCO ₂ e)	(%)	(kgCO ₂ por m ²)
A	2.434	8.933	95.260	90.125	81.192	14,8	29,5
B	1.356	4.978	44.542	41.681	36.703	17,6	35,2
C	956	3.509	23.616	21.599	18.090	23,4	46,8
D	682	2.502	17.800	16.361	13.859	22,1	44,3
					Médias	19,5	39,0

FONTE: O Autor (2017).

4.7.3.1. O IMPACTO DOS CUSTOS PELO USO DO *WOOD FRAME*

Considerando um custo dos materiais e serviços para a substituição das paredes em alvenarias com blocos de concreto convencionais, por paredes

divisórias em *Wood Frame* nos apartamentos de referência e os custos de construção dos apartamentos obtidos com o CUB, verificou-se que a substituição das alvenarias convencionais por *Wood Frame*, implicaria em aumentos de custos da ordem de 2% dos totais das obras.

4.7.4. A MITIGAÇÃO PELAS PAREDES INTERNAS COM BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Observa-se que esse caso trata-se de uma substituição de um item por outro que provoca mais emissões, mas que armazena carbono, assim no saldo final os resultados são positivos.

Para o uso dos blocos com partículas de madeira, calcularam-se as mitigações com as emissões de construção obtidas com o FE base, as emissões de construção corrigidas para este caso e os totais de carbono armazenado. Calcularam-se as mitigações, em kgC por área dos apartamentos e em percentuais das emissões de construção com o FE base.

Na Tabela 55 estão apresentadas as massas de CO₂ armazenadas, as emissões de construção corrigidas com a substituição das alvenarias de tijolos pelas com blocos cimentícios com partículas de madeira e as emissões após a mitigação, isto é, subtraindo-se a massa de CO₂ das emissões corrigidas. Nessa tabela, os valores das mitigações por m² referem-se às áreas dos apartamentos e não as áreas de paredes.

TABELA 55 – MITIGAÇÕES PELO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Efeitos do uso de blocos com partículas de madeira						
Armazenamento		Emissões			Mitigações	
Ap.	CO ₂ (kgC)	FE base (kgCO ₂ e)	Corrigidas (kgCO ₂ e)	Após mitigação (kgCO ₂ e)	(%)	(kgCO ₂ por m ²)
A	6.117	95.260	97.555	91.439	4,0	8,0
B	3.409	44.542	45.821	42.413	4,8	9,6
C	2.403	23.616	24.518	22.115	6,4	12,7
D	1.714	17.800	18.443	16.729	6,0	12,0
Médias					5,3	10,6

FONTE: O Autor (2017).

4.7.4.1. O IMPACTO DOS CUSTOS PELO USO DOS BLOCOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Considerando-se o custo dos materiais e serviços para a substituição das paredes em alvenarias com tijolos cerâmicos convencionais por alvenarias com blocos com partículas de madeira, nos apartamentos de referência, e os custos de construção dos apartamentos, obtidos a partir dos CUB, verificou-se que a substituição causou aumentos de custos da ordem de 1% dos totais das obras.

4.8. AS MITIGAÇÕES PELA INSTALAÇÃO DAS COBERTURAS VERDES

A partir de simulações com edifícios de doze andares com os apartamentos representativos, montou-se a Tabela 56, que contém as informações de áreas e emissões estimadas para os edifícios completos com os apartamentos de “A” a “E”. Para os edifícios de apartamentos “A” a “D”, com estruturas em concreto armado utilizou-se o FE base de 200 kgCO₂ por m². Para o edifício de apartamentos “E”, que é construído em alvenaria estrutural, utilizou-se o FE base de 188 kgCO₂ por m². As CV foram consideradas como ocupando 80% das áreas das coberturas.

TABELA 56 – ÁREAS TOTAIS, DE CV E EMISSÕES DOS EDIFÍCIOS

Edifícios com doze pavimentos e “coberturas verdes”					
Apto.	Pav. Tipo (m²)	Aptos por andar	Total (m²)	Área CV (m²)	Emissões (kgCO₂)
A	524	1	6.287	419	1.257.432
B	490	2	5.880	392	1.175.909
C	520	4	6.235	416	1.246.925
D	392	4	4.699	313	939.840
E	542	8	6.499	433	1.221.741

FONTE: O Autor (2017).

Na Tabela 57 estão as quantidades de carbono armazenadas em cada alternativa de CV par cada edifício, seguidas das mitigações percentuais correspondentes. As mitigações referem-se às emissões totais de construção de cada edifício.

TABELA 57 – CARBONO ARMAZENADO NAS CV E MITIGAÇÕES

Armazenamentos de carbono e mitigações						
Apto.	Coberturas verdes			Mitigações		
	CV1	CV2	CV3	CV1	CV2	CV3
		(kgC)			(%)	
A	45.687	92.212	161.370	3,6	7,3	12,8
B	42.725	86.233	150.908	3,6	7,3	12,8
C	45.305	91.441	160.022	3,6	7,3	12,8
D	34.148	68.922	120.613	3,6	7,3	12,8
E	47.223	95.313	166.798	3,9	7,8	13,7
Médias				3,7	7,4	13,0

FONTE: O Autor (2017).

4.9. O CARBONO ABSORVIDO PELAS ARGAMASSAS DE CAL E CIMENTO

Os consumos dos aglomerantes por traço de argamassa do programa experimental estão apresentados na Tabela 58. Nesta mesma tabela estão colocadas as massas específicas das argamassas, obtidas por ensaios específicos em corpos de prova.

TABELA 58 – CONSUMOS DOS AGLOMERANTES PELAS ARGAMASSAS

Consumos	Unidade	Traços		
		1:1:6	1:3:7,5	1:2:9
Cimento Portland CP II-Z	(g por kg)	80	58	53
Cal hidratada CH II		65	138	85
Areia		750	671	742
Água		104	133	119
Cimento Portland CP II-Z	(kg por m ³)	155	110	102
Cal hidratada CH II		124	265	163
Areia		1.441	1.282	1.425
Água		201	253	229
MASSAS ESPECÍFICAS	(kg por m ³)	1920	1910	1920

FONTE: O Autor (2017).

4.9.1. EMISSÕES DE PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Estimaram-se as emissões de produção utilizando-se os FE colocados na metodologia para as três argamassas. Os resultados estão apresentados na Tabela 59.

TABELA 59 – AS EMISSÕES PARA AS ARGAMASSAS

Arg.	Emissões					FE das argamassas (gCO ₂ e por kg)
	Cimento Portland	Cal hidratada	Areia	Transporte	Mistura	
1:1:6	56,5	58,9	1,8	22,5	3,0	142,7
1:3:7,5	40,5	126,2	1,6	22,5	6,1	196,8
1:2:9	37,4	77,5	1,8	22,5	6,0	145,1
1:1:6	108,5	113,2	3,5	43,2	5,8	274,1
1:3:7,5	77,3	241,0	3,1	43,0	5,7	370,1
1:2:9	71,7	148,7	3,4	43,2	5,8	272,8

FONTE: O Autor (2017).

4.9.2. OS POTENCIAIS DE ABSORÇÃO DE CO₂

A partir das equações 2, 3 e 4, com as frações dos óxidos citadas na metodologia, calcularam-se os potenciais de absorção de CO₂ para cada argamassa, que estão apresentados na Tabela 60. Na parte superior da tabela estão os valores dos potenciais de absorção de CO₂ em g por kg de argamassa. Na parte inferior da mesma tabela estão apresentados os percentuais da massa da argamassa, que podem ser absorvidos em carbono, e quanto em porcentagem, cada aglomerante representa da absorção potencial total.

Para facilitar a visualização, na Tabela 61 estão apresentados, para as argamassas, os resultados nas formas de absorção de carbono por kg, de CO₂ por kg e de kg por m³, todos seguidos dos correspondentes limites de 92% de carbonatação recomendados em Eleni *et al.* (2014).

TABELAS 60 – POTENCIAIS DE ABSORÇÃO DE CO₂ PELAS ARGAMASSAS

Argamassas	Traços		
	1:1:6	1:3:7,5	1:2:9
Potenciais de absorção em massas de carbono			
(gC por kg de argamassa)			
Potencial de absorção pelo cimento	19,7	14,6	13,3
Potencial de absorção pela cal	15,4	34,0	20,7
Potencial de absorção total	35,0	48,6	34,0
Potenciais de absorção em % carbono da massa total da argamassa			
(% da massa da argamassa)			
Potencial de absorção pelo cimento	1,02%	0,76%	0,69%
Potencial de absorção pela cal	0,80%	1,78%	1,08%
Potencial de absorção total	1,83%	2,91%	2,01%
Quanto percentualmente cada aglomerante representa			
(% do carbono absorvido)			
Potencial de absorção pelo cimento	56,1%	30,0%	39,2%
Potencial de absorção pela cal	43,9%	70,0%	60,8%
Potencial de absorção total	100%	100%	100%

FONTE: O Autor (2017).

TABELA 61 – POTENCIAIS DE ABSORÇÃO DE C e CO₂ POR kg E m³

Massas Potenciais de absorção de Carbono	Traços		
	1:1:6	1:3:7,5	1:2:9
Absorção de C	gC por kg argamassa		
Potencial total	9,6	13,2	9,3
Limite de 92%	8,8	12,2	8,5
Absorção de CO₂	gCO ₂ por kg argamassa		
Potencial total	35,0	48,6	34,0
Limite de 92%	32,2	44,7	31,3
Absorção de CO₂	kgCO ₂ por m ³ argamassa		
Absorção pelo cimento	37,8	27,8	25,6
Absorção pela cal	29,5	65,0	39,7
Potencial total	67,3	92,8	65,3
Limite de 92%	61,9	85,4	60,1

FONTE: O Autor (2017).

4.9.3. O PROGRAMA EXPERIMENTAL COM AS ARGAMASSAS DE CAL

Para o programa experimental desse item, revestiram-se tijolos cerâmicos vazados com dimensões de 19x19x13cm, com os três traços de argamassas em uma única camada com três centímetros de espessura. Metade dos tijolos permaneceu armazenada em ambiente interno e metade em ambiente externo, expostos às intempéries.

Depois do endurecimento inicial das argamassas, as bordas de acabamento, assim como as fissuras decorrentes de retração plástica que surgiram nos primeiros dias foram seladas com mastique de poliuretano para forçar que o CO₂ do ar fosse absorvido somente pelas superfícies.

Seguindo-se a metodologia obtiveram-se os resultados dos ensaios de densidade e absorção de água, cujos resultados estão apresentados na Tabela 62.

TABELA 62 – RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS

Traço	Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)		
		28 dias	730 dias	Redução
1:1:6	1,92	11,1	9,9	-11,2%
1:3:7,5	1,91	12,2	10,8	-11,7%
1:2:9	1,92	10,5	9,4	-10,0%

FONTE: O Autor (2017).

Preliminarmente se mediu o Tc presente nos materiais componentes (areia e aglomerantes), com a finalidade de se ter as quantidades iniciais de carbono. Estes valores de carbono constam na idade 0 (zero) da Tabela 63.

Nas idades de 28, 90, 180, 365 e 730 dias extraíram-se amostras de argamassas nos níveis “A”, “B” e “C” dos revestimentos. Os Tc já tratados estatisticamente estão apresentados são os percentuais de carbono por massas das argamassas. A Tabela 64 apresenta as frações dos potenciais de absorção de CO₂ atingidos aos 730 dias (dois anos) de idade.

TABELA 63 – O CARBONO ABSORVIDO NAS DIFERENTES IDADES

Traço	Local	Camada	% de carbono absorvido (idades em dias)					
			0	30	90	180	365	730
1:1:6	Externo	A	0,312	1,671	1,801	1,742	1,874	1,892
		B	0,312	0,409	0,667	0,686	1,552	1,502
		C	0,312	0,776	0,960	1,222	1,536	1,769
	Interno	A	0,312	1,889	1,987	1,727	1,923	2,153
		B	0,312	0,499	0,852	1,156	1,469	1,503
		C	0,312	0,601	0,970	1,025	1,193	1,441
1:3:7,5	Externo	A	0,393	1,996	2,141	1,534	2,377	2,822
		B	0,393	0,501	0,526	0,778	1,583	1,824
		C	0,393	0,904	1,397	1,577	2,021	2,709
	Interno	A	0,393	2,019	2,179	2,138	2,642	2,466
		B	0,393	0,595	0,967	1,294	1,884	1,958
		C	0,393	0,925	1,353	1,541	1,997	2,039
1:2:9	Externo	A	0,303	1,761	1,784	1,624	2,182	2,011
		B	0,303	0,510	0,586	1,117	1,397	1,551
		C	0,303	0,727	0,951	1,333	1,736	1,729
	Interno	A	0,303	1,448	1,792	1,480	1,893	2,057
		B	0,303	0,582	0,699	1,160	1,463	1,321
		C	0,303	0,717	1,021	1,079	1,285	1,461

FONTE: O Autor (2017).

**TABELA 64 – FRAÇÕES DOS POTENCIAIS DE ABSORÇÃO ATINGIDOS
AOS 730 DIAS (DOIS ANOS)**

Traço	Local	Camada	Fração do CO ₂ absorvido do potencial de absorção	
			Por camada	Médias
1:1:6	Externo	A	1,04	0,94
		B	0,82	
		C	0,97	
	Interno	A	1,18	
		B	0,82	
		C	0,79	
1:3:7,5	Externo	A	0,97	0,79
		B	0,63	
		C	0,93	
	Interno	A	0,85	
		B	0,67	
		C	0,70	
1:2:9	Externo	A	1,00	0,84
		B	0,77	
		C	0,86	
	Interno	A	1,02	
		B	0,66	
		C	0,73	
Média geral aos 730 dias				0,86

FONTE: O Autor (2017).

4.9.4. OS ERROS AO SE CONSIDERAR AS EMISSÕES LÍQUIDAS DAS ARGAMASSAS

Para os cálculos de absorções e emissões de carbono utilizaram-se os valores unitários por m³ e os consumos das argamassas nos apartamentos representativos. Na tabela 65 estão os volumes, as emissões e as absorções de CO₂ para cada apartamento.

TABELA 65 – EMISSÕES E ABSORÇÕES PELAS ARGAMASSAS

Ap.	Área revestida (m ²)	Volume de argamassa (m ³)	Emissões (kgCO ₂ e)			Absorções (kgCO ₂)		
			1:1:6	1:3:7,5	1:2:9	1:1:6	1:3:7,5	1:6:9
A	1.495	29,9	8.195	11.065	8.158	1.851	2.553	1.653
B	648	12,96	3.552	4.796	3.536	802	1.106	717
C	372	7,44	2.039	2.753	2.030	461	635	411
D	281	5,62	1.540	2.080	1.533	348	480	311
E	196	2,94	806	1.088	802	182	251	163

FONTE: O Autor (2017).

Para avaliar os erros decorrentes da consideração de emissões líquidas nos relatórios de emissões foram calculadas as emissões corrigidas pelas construções dos apartamentos com os FE base. Essas são as emissões totais obtidas com os FE base, mais as absorções de CO₂ pelas argamassas que não deveriam ser descontadas. Também foram calculados os erros percentuais decorrentes do desconto das absorções. Os valores das emissões considerando os FE base, as emissões corrigidas e os erros percentuais estão apresentados na Tabela 66.

TABELA 66 – EMISSÕES DE CONSTRUÇÃO CORRIGIDAS E ERROS

Ap.	FE base (kgCO ₂ e)	Emissões Corrigidas (kgCO ₂ e)			Erro (%)		
		1:1:6	1:3:7,5	1:2:9	1:1:6	1:3:7,5	1:6:9
A	95260	97.111	97.813	96.913	1,9	2,6	1,7
B	44540	45.342	45.646	45.257	1,8	2,4	1,6
C	23620	24.081	24.255	24.031	1,9	2,6	1,7
D	17800	18.148	18.280	18.111	2,0	2,6	1,7
E	11562	11.744	11.813	11.725	1,6	2,1	1,4
Médias:					1,8	2,5	1,6

FONTE: O Autor (2017).

4.9.5. INFLUÊNCIA DA CAL E DO CIMENTO SOBRE AS ABSORÇÕES

Com o objetivo de se identificar qual dos aglomerantes, cal ou cimento Portland, foi o mais representativo na captura do CO₂ atmosférico, procederam-se diversas comparações entre as massas de carbono absorvido em dois anos

e as massas dos aglomerantes utilizados. O carbono absorvido em dois anos é a massa de carbono medida nesta idade subtraída da massa de carbono pré-existente nos materiais.

As relações somente com a massa de um dos aglomerantes isoladamente não produziram valores lógicos, mas quando se calculou as relações da soma das massas dos dois aglomerantes com as massas de carbono absorvidas em dois anos, os resultados, (multiplicados por cem para facilitar a visualização), mostraram uma constante (12), conforme está mostrado na Tabela 67.

TABELA 67 – AS RELAÇÕES DE CARBONATAÇÃO E OS AGLOMERANTES

Traço	Aglomerantes / kg de argamassa			Carbono absorvido 2 anos (g por kg de argamassa)	Relações Carb. Absorv./aglom. X 100		
	Cimento (g)	Cal Hidratada (g)	Total (g)		CP	CH	Aglom. Totais
1:1:6	80,5	64,7	145,2	17,10	21	26	12
1:3:7,5	57,7	138,5	196,2	23,03	40	17	12
1:2:9	58,2	85,0	138,2	16,88	32	20	12

FONTE: O Autor (2017).

A constante 12, observada na última coluna da Tabela 67 significa que as relações entre as quantidades em massa de carbono absorvido e as massas totais de aglomerantes são quase as mesmas, independente do traço e dos consumos de aglomerante. É interessante observar como informações suplementares, que as densidades e absorções medidas para as argamassas foram estatisticamente semelhantes. Pode-se então deduzir que os hidróxidos tanto originários da cal como do cimento Portland carbonataram.

5. DISCUSSÕES

Dentro desse item estão apresentadas individualmente por material ou técnica estudados, as discussões sobre as mitigações de emissões alcançadas.

a) Os “materiais usuais”:

Analisando-se inicialmente as mitigações das emissões pelos materiais “usuais” de madeira, (portas, pisos e forros), verifica-se que essas são ligeiramente superiores nos apartamentos de maior tamanho, mas para todos os resultados aproximam-se bastante da média de mitigação, que é de 17,6 kgCO₂ por m² de área construída ou 8,9% de mitigações do total das emissões de construção considerando os FE base de construção.

É relevante relatar-se que o *Cenário 1* de acabamentos de madeira utilizado nos apartamentos “A” e “B”, tem pisos e portas mais pesados por unidade, portanto armazenam mais carbono, enquanto o *Cenário 2* utilizado nos apartamentos “C”, “D” e “E” tem pisos e portas mais leves. Os forros para ambos são semelhantes.

Observa-se que os produtos “usuais” já estão presentes nos apartamentos brasileiros, falta somente às empresas as contabilizarem essas mitigações para contrabalançar parte das suas emissões.

b) O “MDP”:

Quanto às mitigações das emissões pelos produtos “não usuais” sugeridos. Evidentemente o MDP armazena mais carbono do que emite pela sua produção, proporcionando uma significativa mitigação de emissões. Ressalvando o apartamento “A”, nos demais apartamentos obteve-se uma mitigação entre 11,1 e 13,4 kgCO₂ por m² de área construída, valores que representam de 5,6 a 7,1 % das emissões de construção. O valor mais baixo obtido de mitigações para o apartamento “A” foi devido a sua grande área de piso exposta à umidade.

O MDP ideal para essas aplicações seria um painel produzido com resina FF para se obter uma maior resistência à umidade, o interessante seria também usar-se o fosfato amônia para aumentar a resistência ao fogo.

O acréscimo de custos decorrentes da aplicação do MDP, da ordem de 1,3 a 1,5%, parece justificar a sua aplicação, salientando-se ainda que de qualquer forma, para atender a NBR 15575:2013 necessita-se instalar algum sistema de isolamento, que obviamente também tem custo.

c) O *Wood Frame*:

Sobre os resultados das reduções de emissões pelo uso de paredes divisórias em *Wood Frame*, observa-se que nos apartamentos maiores, as mitigações são inferiores. Isto se deve aos tamanhos médios dos cômodos que neste tendem a serem maiores nesses apartamentos, portanto as quantidades de paredes divisórias, por unidades de áreas dos apartamentos são menores.

Mas o é importante colocar com o *Wood Frame* foram alcançados valores de mitigações de emissões, com médias de 19,5% ou 39,0 kgCO₂ por m² de área construída, que são resultados muito interessantes.

Ressalta-se também que a substituição neste sistema dos painéis de gesso acartonado por painéis compensados, como se procedem nos EUA, acarretaria em menores emissões, maior armazenamento de carbono e, portanto maiores mitigações.

O aumento de custos, devido à substituição das alvenarias convencionais por paredes divisórias *Wood Frame*, da ordem de 2% do custo total da obra é significativo, mas não exageradamente grande.

d) Os blocos com partículas de madeira:

Observa-se nos resultados das emissões das paredes com estes blocos são superiores as emissões de paredes com tijolos cerâmicos, mas as mitigações obtidas com o uso dos blocos com partículas de madeira fazem da opção do uso desses últimos, mais interessante sob o ponto de vista das emissões líquidas.

Verificando-se os resultados das reduções de emissões devido ao uso dos blocos com partículas de madeira, como o esperado, observou-se que estes foram inferiores aos obtidos com substituição das paredes convencionais por *Wood Frame*. As médias de reduções foram de 5,3% ou 10,6 kgCO₂ por m² de área construída.

Novamente analisando-se os aumentos de custos devido a substituição das alvenarias convencionais pelas alvenarias com blocos com partículas de madeira, de valores da ordem de 1% do custo total da obra, verifica-se que estes são relevantes, mas não exagerados.

Outra característica interessante decorrente do uso desses materiais com madeira, como as divisórias *Wood Frame* ou de paredes com os blocos com partículas de madeira, é que essas são mais leves que as soluções tradicionais e permitiriam cargas permanentes menores nas estruturas dos edifícios. Essas estruturas seriam também mais leves e consequentemente produziram menos emissões para sua construção.

A seguir está uma análise geral do uso dos materiais de e com madeira para uso interno nos apartamentos quanto às mitigações de emissões:

Para se proceder a uma análise geral dos materiais de madeira montou-se a Tabela 68, que contém todos os resultados de reduções de mitigações alcançados.

A Tabela 69 apresenta as somas das mitigações das alternativas “Materiais usuais” com “MDP em pisos” e ainda “*Wood Frame*”. Obtiveram-se os totais de mitigações de emissões da faixa de 27,6 a 37,4% nos apartamentos de “A” a “D”.

TABELA 68 - COMPARATIVO DAS MITIGAÇÕES

Mitigações das emissões já consideradas as substituições								
Ap.	Materiais usuais		MDP em pisos		<i>Wood Frame</i>		Bloco c/ partículas madeira	
	kgCO ₂ por m ²	%FE base corrig.	kgCO ₂ por m ²	%FE base corrig.	kgCO ₂ por m ²	%FE base corrig.	kgCO ₂ por m ²	%FE base corrig.
A	20,3	10,2	5,3	2,7	29,5	14,8	8,0	4,0
B	24,0	12,0	11,2	5,6	35,2	17,6	9,6	4,8
C	16,9	8,4	11,1	5,6	46,8	23,4	12,7	6,4
D	13,4	6,7	12,5	6,3	44,3	22,1	12,0	6,0
E	13,2	7,0	13,4	7,1	-	-	-	-
Médias	17,6	8,9	10,7	5,4	39,0	19,5	10,6	5,3

FONTE: O Autor (2017).

Para o apartamento “E”, como este é construído com paredes estruturais, não foi possível a consideração de divisórias leves como de *Wood*

Frame ou blocos cimentícios com partículas de madeira, portanto a mitigação só atingiu o percentual de 14,1%.

TABELA 69 - MITIGAÇÕES TOTAIS ALCANÇADAS
(“USUAIS” + MDP + *WOOD FRAME*)

Apartamento	Área (m ²)	Mitigações	
		(kgCO ₂ por m ²)	% do FE base
A	476,3	55,2	27,6
B	222,7	70,4	35,2
C	118,1	74,8	37,4
D	89,0	70,3	35,1
E	61,5	26,6	14,1
Média		59,4	29,9
Média aptos A a D		67,7	33,8

FONTE: O Autor (2017).

Somando-se as três ações, (materiais usuais + MDP + *Wood Frame*) obtiveram-se valores de mitigações da ordem de 30%, que podem ser perfeitamente alcançadas em apartamentos sem perdas de qualidade e desempenho e com acréscimos de custos de construção de cerca de 3%. Salientando-se que a média para os aptos de “A” a “D”, que podem utilizar o *Wood Frame* é de 33,8%.

e) As “coberturas verdes:

Para os edifícios com doze pavimentos com uma “cobertura verde” tipo CV3 em 80% da sua área de cobertura, alcançou-se a média de mitigações de 13% para todo o edifício.

Obviamente para edifícios mais altos as mitigações serão bem menores e para os mais baixos maiores, tendo em vista que há uma única cobertura, mas a técnica em si se mostrou muito eficiente.

É importante observar que a metodologia sugerida pelo SINDUSCON-SP (2013) obriga a contabilização das emissões da supressão vegetação pré-existente no local de implantação da obra, mas não indica para a contabilização do carbono retirado em conjunto com o solo original, mas no caso de uma ACV este valor deve ser contabilizado. De qualquer forma, uma “cobertura verde” colabora bastante para a mitigação das emissões da obra.

f) Os erros ao se considerar as emissões líquidas das argamassas

Em relação à absorção de CO_2 pelas argamassas com cal e cimento, em primeiro lugar é importante reafirmar da necessidade de considerarem-se separadamente emissões das absorções. As Normas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14025:2015 não permitem que sejam utilizados os valores líquidos, ou diretamente as mitigações subtraídas das emissões. O correto é colocar as emissões no somatório e no final citar as absorções, podendo-se fazer inclusive a subtração em um balanço final. O tecnicamente correto é considerar como limite para as absorções, 92% do potencial total de carbonatação dos hidróxidos, conforme as ACV internacionalmente aceitas. Por exemplo, para a argamassa de traço 1:1:6 do programa experimental deve-se relatar as emissões de 274,1 kgCO_2 e por m^3 e as absorções de 61,9 kgCO_2 por m^3 , com emissões líquidas finais de 212,2 kgCO_2 e por m^3 .

Verificando os resultados de emissões e absorções obtidos, com as quantidades de argamassas aplicadas nos apartamentos base, observou-se que os erros para uma obra completa representam da ordem de 2 % dos totais de emissões.

Analisando-se o programa experimental das argamassas, verificando-se que os percentuais de carbono absorvido em dois anos significam 86% em média do potencial total, pode-se considerar válido o limite de 92% citado em Eleni *et al.* (2014).

Salienta-se que durante vários anos ocorre a absorção de CO_2 pelas argamassas e nesse estudo os revestimentos de argamassas foram mantidos expostos diretamente ao ar, sem nenhum acabamento de massa corrida ou pintura. Portanto, os revestimentos estudados estavam mais expostos que nas obras reais, que quase sempre tem acabamentos de massa corrida e pintura entre eles e a atmosfera, portanto a velocidade de carbonatação das argamassas aplicadas nas obras deve ser bem mais lenta.

Outro fator que colabora no mesmo sentido, é que os tijolos cerâmicos utilizados no estudo estavam livres, não assentados em uma parede. Dessa forma, o ar atmosférico circulava facilmente pelos furos, favorecendo a carbonatação das camadas mais internas das argamassas. Pode-se então

interpretar este ensaio de dois anos como um ensaio que acelera as condições verdadeiras de carbonatação das argamassas.

6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitem concluir que a hipótese se confirmou, e que o objetivo principal desta tese, de mostrar que o uso de materiais de madeira duráveis armazenam quantidades significativas de carbono foi atingido.

Dentro da pesquisa foram também obtidos os resultados específicos de armazenamento de carbono nas portas, pisos e forros, que são produtos de madeira já usuais em edifícios residenciais, mostrando que as quantidades de carbono armazenadas nestes atingem valores das mitigações de 17,6 kgCO₂ por m² de área construída ou 8,9% do total das emissões de construção considerando os FE base.

Foram também avaliadas as alternativas construtivas do uso de MDP para isolamento acústico em pisos e de paredes divisórias *Wood Frame*, mostrando que ambas armazenam quantidades importantes de carbono e não acrescentam custos significativos aos apartamentos.

Por meio do uso do MDP se alcançou mitigações médias de 5,4 % ou 10,7 kgCO₂ por m² de área construída, com o uso de *Wood Frame* mitigações médias de 16,4% ou 32,82 kgCO₂ por m² de área construída.

Com a consideração conjunta dos materiais “usuais”, do MDP e do *Wood Frame*, alcançou-se de mitigações da ordem de 30% sobre as emissões de construção. Estes valores demonstram a relevância do impacto desses materiais para mitigar as emissões de construção.

Observando-se a capacidade dos materiais de e com madeira de armazenamento de carbono, é fácil perceber que ampliações do uso desses pode aumentar muito as taxas de mitigações.

Também foi atingido o objetivo de provar a eficiência das “coberturas verdes” como forma de armazenar carbono nos edifícios. Os resultados de mitigações colocam de forma bem evidente a relevância desta técnica construtiva para a finalidade de armazenar carbono. Com uma cobertura verde do tipo CV3 alcançou-se 13% de mitigações de um edifício inteiro de 12 pavimentos.

O objetivo de demonstrar a importância de se relatar corretamente as emissões e absorções de CO₂ pelas argamassas de revestimento que contém cal e cimento igualmente foi alcançado. Os experimentos e cálculos apresentados mostraram erros da ordem de 2% dos totais de emissões que os relatórios de obras de edifícios residenciais incorrem ao relatar diretamente as emissões líquidas dessas argamassas.

O objetivo de se fornecer subsídios legais e esclarecer formas de como contabilizar o carbono armazenado nos produtos de madeira e nas argamassas de cal nos relatórios de emissões e análises de ciclo de vida foi alcançado com a apresentação das Normas e demais informações colocadas na revisão bibliográfica, que indicam claramente considerar o carbono de origem não fóssil, para a mitigação de emissões.

Com os resultados apresentados pode concluir-se que a indústria florestal de madeira manejada recebeu com este trabalho informações e argumentos bastante favoráveis ao uso de seus produtos na construção civil.

Pode-se concluir também que foram apresentados caminhos para a indústria da construção civil para que, com acréscimos mínimos de custos e sem perdas de qualidade, se aproximar da meta de se construir com emissões neutras.

Cabe ressaltar, que para um país como o Brasil, com enorme potencial para as indústrias florestal, madeireira e da construção civil, dentro do contexto do problema mundial do efeito estufa, é muito importante o aperfeiçoamento dos cálculos das emissões setoriais e nacional que são apresentados no IPCC.

7. RECOMENDAÇÕES

A seguir estão algumas recomendações para pesquisas futuras:

- Novas sugestões para o uso de materiais de e com madeira nos edifícios;
- O MDP para o isolamento acústico de pisos e verificações da eficiência desses para o isolamento acústico, do comportamento do MDP a umidade presente nos pisos secos dos apartamentos;
- O uso de partículas de madeira como agregados em argamassas de revestimentos e de regularização pisos, como forma de armazenar carbono nos edifícios;
- Estudos dos materiais e técnicas construtivas com madeira e derivados que são aplicadas em áreas comuns ou coletivas, como em coberturas, áreas de recreação, garagens e entradas dos edifício.

REFERÊNCIAS

- ABCP. **Associação Brasileira do Cimento Portland**. Boletim técnico - guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo - SP, dezembro de 2002. 28 p.
- ALBUQUERQUE, J. L. Diagnóstico ambiental e questões estratégicas: uma análise considerando o Polo Gesso do sertão do Araripe – Estado de Pernambuco. 2002. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba - PR, 2002. 185 p.
- ALMEMARK, M. LCA of Reinforcement Steel Products from Celsa Steel Service in Sweden, Norway, Denmark, and Finland. IVL-Report U 5330, **IVL Svenska Miljöinstitutet**, Norway. 2015. 12 p.
- ALMEIDA, M.; DIAS, A. C.; CASTANHEIRA, E.; ARROJA, L. Environment product declaration in ceramic materials as sustainability tool. **Life Cycle Management Conference LCM 2011**, Berlin, Germany, 2011. 10 p.
- AMC and CWC. EPD 13CA24184.108.1 – Particleboard. **American Wood Council and Canadian Wood Council**. 2013. 17 p.
- ATHENA Sustainable Materials Institute**. Cement and Structural Concrete Products: Life Cycle Inventory (Update #2). Ottawa, Canada, 2005. 185 p.
- ATHENA Sustainable Materials Institute**. Life Cycle Assessment of Log Wall and Timber Frame Systems Produced in British Columbia. Ottawa, Canada, 2012a. 7 p.
- ATHENA Sustainable Materials Institute**. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Softwood Plywood Sheathing - an Update. Ottawa, Canada, 2012b. 51 p.
- BALDESSAR, S. M. N. Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, **Universidade Federal do Paraná**. Curitiba - PR, 2012. 125p.
- BARBOSA, P. P.; SILVA, T. L.; GALASSI, C.; LUZ, S.; De ANGELIS NETO, G. Análise dos impactos ambientais da produção de blocos cerâmicos. **SIMPGEU -**

III Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Maringá - PR, novembro 2012. 10 p.

BARTHOLOMEU, D. B. Quantificação dos impactos econômicos e ambientais e decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras. Tese de Doutorado, **Universidade de São Paulo**, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba - SP, 2006. 165 p.

BERGMAN, R.; PUETTMANN, M.; TAYLOR, A.; SKOG, K. E. The Carbon Impacts of Wood Products. **Forest Products Journal**. Volume 64, Number 7/8, pp. 220–231. Peachtree Corners - GA, U.S.A., 2014.

BORGES NETO, C. Manual Didático de Ferrovias. **Universidade Federal do Paraná**, Setor de Tecnologia, Departamento de Transportes. Curitiba - PR, 2011. 90 p.

BOSENMEYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-EHW-2008221-E – EGGER Direct Print (DPR®) Laminate flooring. Königswinter, Deutschland, 2011. 21 p.

BOSENMEYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-EHW-2008112-E- EGGER EUROSTRAND® OSB -EGGER OS’Brace. Königswinter, Deutschland, 2012a. 21 p.

BOSENMEYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-EHW-2008111-E - Environmental Product Declaration number Glunz AG AGEPAN® OSB Greenline OSB. Königswinter, Deutschland, 2012b. 22 p.

BOSENMEYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-ELF-2009211-E - Printed Décor Laminate Floor Covering (PDL Floor Covering). Königswinter, Deutschland, 2012c. 21 p.

BOSENMEYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-ELF-2009311-E - High Pressure Laminate Floor Covering. Königswinter, Deutschland, 2012d. 22 p.

BOSENMEYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-EHW-20130012-IBC1-DE - Laminate flooring (DPL) Egger GmbH. Egger Retail Products GmbH & Co. Königswinter, Deutschland, 2013a. 12 p.

BOSSENMAYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-DGI-20130062-CBD1-EN. Gypsum Plasterboards - Dalsan Gypsum Industry and Trade Inc. Königswinter, Deutschland, July, 2013b. 7 p.

BOSSENMAYER, H. J. **IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V.** EPD-EPL-20150021-CBE1-EN - European Producers of Laminate Flooring. Königswinter, Deutschland, 2015a. 8 p.

BOYD, P. W.; JICKELLS, T; LAW, CS; BLAIN, S; BOYLE, EA; BUESSELER, KO; COALE, KH; CULLEN, JJ; DE BAAR, HJ; FOLLOWS, M; HARVEY, M.; LANCELOT, C.; LEVASSEUR, M.; OWENS, N. P. J.; POLLARD, R.; RIVKIN, R. B.; SARMIENTO, J.; SCHOEMANN, V.; SMETACEK, V.; TAKEDA, S.; TSUDA, A.; TURNER, S.; WATSON, A. J.; et al. (2007). Mesoscale Iron Enrichment Experiments 1993-2005: Synthesis and Future Directions. **Science** Vol. 315, Issue 5812, p. 612-617, 02 Feb. 2007.

BRIBÁN, Z. I.; CAPILLA, V. A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, Volume 46, p. 1133- 140, May 2011.

BUCHANAN, A.H.; LEVINE S.B. Wood based building materials and atmospheric carbon emissions. **Environmental Science and Policy**, 2, p. 427-437, Amsterdam, Holland, 1999.

CAMPOS, E. F. Emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, **Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2012. 172 p.

CARASEK, H. Materiais de Construção Civil e Princípios de. Ciência e Engenharia de Materiais. Capítulo 26 – Argamassas. **IBRACON**, São Paulo, - SP, 2007.

CBCS **Conselho Brasileiro de Construção Sustentável**, Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto, Novembro de 2014. São Paulo – SP, 2014. 93 p.

CBIC **Câmara Brasileira da Indústria da Construção**. Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15.575/2013. 2ª Edição, Brasília - DF, abril de 2013. 311 p.

CETESB **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo, 2ª Edição. São Paulo - SP, 2011. 95 p.

CMC. EPD-012 Concrete reinforcing steel. **COMMERCIAL METALS COMPANY**, Irving, TX, U.S.A., 2015. 9 p.

CIZER, O.; VAN BALEN K.; ELSEN J.; VAN GEMERT, D. Crystal morphology of precipitated calcite crystals from accelerated carbonation of lime binders. Proceedings ACEME08, **2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering**, p. 149-158, Rome, Italy, October 2008.

COSTA, B. L. C. Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil. Dissertação de Mestrado de Pós-graduação em Engenharia Civil, **COPPE – UFRJ**, Rio de Janeiro - RJ, 2012. 190 p.

DALLAGNOL F. S.; MOGNON F.; SANQUETTA C. R.; DALLA CORTE A. P. Teores de Carbono de Cinco Espécies Florestais e seus Compartimentos. **Floresta e Ambiente**; 18(4): p. 410-41, out./dez. 2011.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 102-113, jun. 2004.

ELENI, D.; THOMAS, S.; AURELA, S.; FREDERIK, V. Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, **9th International Masonry Conference 2014**, Guimarães, Portugal, 2014. 12 p.

EN 15804:2014-07 (E). **European Committee for Standardization**. Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. European Standard - Sustainability of construction works, 2014. 65 p.

EN 15978:2011. **European Committee for Standardization**. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. European Standard - Sustainability of construction works, 2011. 60 p.

EN 16449:2014. **European Committee for Standardization**. Wood and wood-based products — Calculation of sequestration of atmospheric carbon dioxide. European Standards, 2014. 8 p.

EN 16485:2014. **European Committee for Standardization**. Round and sawn timber — Environmental Product Declarations — Product category rules for wood and wood-based products for use in construction. European Standards, 2014. 26 p.

ENSLIC BUILDING. D 4.2. CIRCE. Pilot Case 3. **ENSLIC - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings**, 2010a. 6 p.

ENSLIC BUILDING. LCA of Housing Building in Frankfurt – Case 18. **ENSLIC - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings**, 2010b. 8 p.

EVEN Construtora e Incorporadora S/A. RELATÓRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - Inventário 2011. São Paulo – SP, 2012. 43 p.

EVEN Construtora e Incorporadora S/A. RELATÓRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - Inventário 2014. São Paulo – SP, 2015. 26 p.

EVEN Construtora e Incorporadora S/A. RELATÓRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - Inventário 2015. São Paulo – SP, 2016. 25 p.

FEIZA R., AMMENBERG J., BAAS L., EKLUND M., HELGSTRAND A.; MARSHALB R. Utilizing LCA and key performance indicators to assess development within the cement industry - a case study of a cement production cluster in Germany. ETH Zurich, Institute of Environmental Engineering. **Environmental Science and Technology**, 43 (19), p. 7578–7583, Zurich, Switzerland, 2009.

FERRO, F. S.; BRUGNERA, R. R.; SILVA, D. A. L.; ROCCO L. F. A. Avaliação do Ciclo de Vida de Painéis Compósitos à Base de Madeira: Estudo de Caso em Painéis OSB. **5º Academic International Workshop - Cleaner production towards a sustainable transition**, São Paulo - SP, maio de 2015. 10 p.

FGV **Fundação Getulio Vargas**, Programa Brasileiro GHG Protocol - Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de Gases do Efeito

Estufa (GEE). GVces - Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas – EAESP, São Paulo - SP, 2009. 24 p.

FREITAS J. A.; SANQUETTA C. R.; SANQUETTA M. N. I.; DALLA CORTE A. P.; SANQUETTA F. T. I. Estocagem em carbono em portas internas de madeira de edifícios residenciais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v.11 n.22; p. 11183, - Goiânia – GO, 2015.

FREITAS J. A.; SANQUETTA C. R.; IWAKIRI S.; COSTA M. R. M. M.; KOEHLER H. S. Estudo da aplicação de coberturas verdes no objetivo de se construir edifícios neutros em carbono. **Holos Environment**, 17 (1): p 35-52. 2017.

FREITAS, J. A. Novos aditivos otimizam o uso de concretos avançados. **Revista Grandes Construções** - Sustentabilidade, Edição 38, julho/2013, São Paulo - SP. 1 p.

FREITAS, J. A.; PARCHEN, C. F. A.; PARCHEN, M. F. R. Importância do concreto na geração de CO₂ em um caso de obra de um edifício. 52º Congresso Brasileiro do Concreto, **IBRACON**, São Paulo – SP, 2010. 16 p.

FSC **Forest Stewardship Council**, FSC-STD-50-001 (V1-2) - Norma Internacional do FSC - Requisitos para uso das marcas registradas do FSC por portadores de certificados. 1996. 30 p.

GARRISON, N.; HOROWITZ, C. Looking Up: How Green Roofs and Cool Roofs Can Reduce Energy Use, Address Climate Change, and Protect Water Resources in Southern California. Natural Resources Defense Council, Emmet Center on Climate Change and the Environment, **UCLA School of law**. Los Angeles - CA, U.S.A., June 2012. 33 p.

GETTER, K. L.; ROWE D. B.; ROBERTSON, G. P.; CREGG, B. M.; ANDRESEN, J. A. Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. **Environment. Science and Technology**, 43 (19), p 7564–7570, 2009.

GRÜTTER, J.; KAPPEL, R.; STAUB, P. The GHG market on the eve of Kyoto ratification. New York, **National Strategy Studies**, 2002. 23 p.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. **Building and Environment**, Volume 41, Issue 7, p. 940 – 951, July 2006.

HARRISON, D. P. A method for estimating the cost to sequester carbon dioxide by delivering iron to the ocean. **Journal of Global Warming**, Vol.5, No.3, p. 231– 254, 2013.

HETSCH, S. Proceedings of the Workshop on Harvested Wood Products in the Context of Climate Change Policies 9-10 September 2008. United Nations Palais des Nations, Geneva, Switzerland. **UNECE/FAO Timber Section**, October 2008, Geneva, Switzerland. 47 p.

HUBBART, S. S.; BOWE, S. A. Life-Cycle Inventory of Solid Strip Hardwood Flooring in the Eastern United States. **National Wood Flooring Association (NWFA) - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials (CORRIM): Phase II Final Report**, 2008. 59 p.

HSU, S. L. Life Cycle Assessment of Materials and Construction in Commercial Structures: Variability and Limitations. Thesis of Master in Civil and Environmental Engineering, **Massachusetts Institute of Technology**, Cambridge - MA, U.S.A., June, 2010. 56 p.

IAC **Inter Academy Council**, Lighting the way: Toward a sustainable energy future. Amsterdam, The Netherlands. October 2007. 208 p.

IEA **International Energy Agency**, Technology Roadmap - Carbon capture and storage, 2013 edition. Paris, France, 2013. 63 p.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**, Technological and Economic Potential of Options to Enhance, Maintain, and Manage Biological Carbon Reservoirs and Geo-engineering. Item 4.3.2.1 Wood Products. IPCC - Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR), 2001.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**, Harvested Wood Products. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 12, 2006a.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**, National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japão: IGES, 2006b.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 3 - Chapter 4 - Industrial Processes and Product Use. GNG Gas Inventories, Volume 3, - Metal Industry Emissions, 2006c.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Mobile Combustion. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 - Energy, Chapter 3, 2006d.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 1 – General Guidance and Reporting, 2006e.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, New York, NY, U.S.A., 2007a.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate Change 2007: IPCC Synthesis Report. IPCC, 2007b.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, 2007c.

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to AR5, 2014.

ISO 14025:2006. **ISO - International Organization for Standardization** Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO 14040:2006. **ISO - International Organization for Standardization**. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO 14044:2006. **ISO - International Organization for Standardization**, Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO 14064-2:2006. **ISO - International Organization for Standardization**, Greenhouse gases — Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO/TS 14067:2013. **ISO - International Organization for Standardization**, Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication. Geneva, Switzerland, 2013.

ITTC International Tropical Timber Council - Committee on Reforestation and Forest Management. Report carbon removals and emission associated with production and use of harvested wood products: a case study on plywood based flooring product, Forty-ninth Session, 16-21 November 2015, Kuala Lumpur, Malaysia, 2015. 28 p.

IWAKIRI, S. Painéis de Madeira Reconstituída. **FUPEF - Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná**, Curitiba - PR, 2005. 254 p.

JOHN, V. M. Projeto para ACV Simplificada para Construção Brasileira. Proposta elaborada pelo Comitê de Materiais do CBCS. **Conselho Brasileiro de Construção Sustentável**, 2013. 51 p.

JOHN, V. J; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. Produção de cal - relatório final. Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas. EBC - Economia de Baixo Carbono, **Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto**, Ribeirão Preto - SP, dezembro de 2014. 76 p.

JOHNSON, J. and NEWTON, J. Building green – A Guide to using on Roofs, Walls and Pavements. **Staffordshire University**, London Ecology Unit, London, UK, 1991. 94 p.

KHOL, A. L.; NIELSEN, R. B. Gas purification. 5th Edition. **Gulf Publishing Company**. Texas, U.S.A., 1997. 900 p.

KREBS, L. F. Coberturas vivas extensivas: análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e serra gaúcha. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia **UFRGS**, Porto Alegre - RS, 2005. 184 p.

KUITTINNEN, M.; LUDVIG, A.; WEISS, G. Wood in carbon efficient construction - Tools, methods and applications. **Hämeen Kirjapaino Oy**, Finland, 2013. 163 p.

LAGERBLAD, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art. **Cement och Betong Institutet - CBI**, Stockholm, Sweden, 2005. 47 p.

LARRIBA, A. B.; WOLF, O.; PIGNHATELLI, S.; BALDO, G. L. Preliminary report on the revision of European ecolabel for the product group - “wooden floor covering”. **European Commission - Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies**, Seville, Spain, September 2014. 214 p.

LAWRENCE, R. M. H. A study of carbonation in nonhydraulic lime mortars. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, **University of Bath**, Faculty of Engineering and Design, Department of Architecture and Civil Engineering, Bath, U.K. October 2006. 344 p.

LEGGETT, J. A.; LATTANZIO, R. K.; EK C.; PARKER, L. An Overview of Greenhouse (GHG) Control Policies un Various Countries. **Congressional Research Service**. Washington DC, U.S.A., December 30, 2009. 52 p.

LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. Bioenergia – Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação. **Editora UNESP – Cultura Acadêmica**. São Paulo - SP, 2012. 1072 p.

LI, W.C.; YEUNG, K.K.A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. **Elsevier, International Journal of Sustainable Built Environment**, Volume 3, Issue 1, p. 127–134, June 2014.

LIMA, J. A. R. Avaliação das consequências produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas. Tese de Doutorado, **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo - SP, 2010. 151 p.

LOBO, F. H. R.; SANTOS, A. P. L.; TAVARES, S. F. Ferramentas de planejamento para levantamento de inventário de emissão de CO₂: Estudo de caso. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**. Universidade

Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas. Florianópolis - SC, 2010. 18 p.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. **Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente**, São Paulo - SP, abril 2004. 32 p.

MALONEY, T. M. Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing. **Miller Freeman Publications Inc.**, California, USA, 1993. 681 p.

MARCEAU, M. L.; VanGEEM, M. G. Comparison of the Life Cycle Assessments of an Insulating Concrete Form House and a Wood Frame House. **Journal of ASTM International**, Vol. 3, No. 9, p. 1-11, 2006.

MARCOS, M. H. C. Análise da emissão de CO₂ na fase pré-operacional da construção de habitações de interesse social através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM. Dissertação de mestrado do Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba - PR, 2009. 130 p.

MARLAND G.; BODEN T. A.; ANDRES R. J. Global, Regional, and National CO₂ Emissions. A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, **Oak Ridge National Laboratory**, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A, 2003. 984 p.

MATTANA, A. JR. Estudos de cales hidratadas de mercado - caracterização química, física e comportamento reológico da pasta. Dissertação de mestrado do Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba - PR, 2013. 148 p.

MCT. **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA**. Ministério de Ciência e Tecnologia - Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa. Relatório de referência. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – Produtos minerais (Parte II) – Cal / Usos do calcário e dolomita / barrilha. Brasília - DF, 2010. 81 p.

MEHTA, P. K.; Reducing the Environmental Impact of the concrete. Concrete International, **Concrete International Magazine**, p 61–66, October 2001.

MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials 4th Edition. **McGraw-Hill**, New York – NY, U.S.A., 2006. 672 p.

MINEROPAR. Perfil da Indústria de Cerâmica no Estado do Paraná. **IPARDES**, Mineropar – Minerais do Paraná S/A, Curitiba - PR, 2000. 78 p.

MINEROPAR. Setor da Cerâmica Vermelha no Paraná. **IPARDES**, Mineropar – Minerais do Paraná S/A, Curitiba - PR, 1997. 49 p.

MME. **MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA**. Balanço Energético nacional 2016 – Ano base 2015. **Ministério das Minas e Energia** – Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro - RJ, 2016. 62 p.

MENET J. L.; GRUESCU I. C. Comparative life cycle assessment of a building component: case of a front door. p. 6-7, **Proceedings 2nd LCA Conference**, Lille, France, November 2012. 4 p.

MICALES, J. A.; SKOG, K. E. The Decomposition of Forest Products in Landfills. International Biodeterioration & Biodegradation Vol. 39, No. 2–3 (1997) p. 145–158. **Elsevier Science Limited**, Great Britain, 1997.

MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. Centro de Ciências Florestais e da Madeira. Apostila para uso didático, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, **Universidade Federal do Paraná**. Curitiba - PR, 2014. 208 p.

MORRIS, R. EPD S-P-00506. 12.5mm Gyproc WallBoard. Environmental Product Declaration - **BPB United Kingdom Limited** - British Gypsum. December 2013. 18 p.

MOYA, J. A.; PARDO, N.; MERCIER, A. Energy Efficiency and CO₂ Emissions: Prospective Scenarios for the Cement Industry. JRC Scientific and Technical Reports, **Luxembourg: Publications Office of the European Union**, 2010. 87 p.

MUNHOZ, F. C.; RENÓFIO, A. Uso da Gipsita na Construção Civil e Adequação para a P+L. **XIII SIMPEP** – Bauru - SP, Brasil, 6 a 8 de Novembro de 2006. 10 p.

NBR 5732:1991. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Cimento Portland Comum. São Paulo - SP, 1991.

NBR 5735:1991. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cimento Portland de alto forno - EB 208. São Paulo - SP, 1991.

NBR 5736:1991. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cimento Portland Pozolânico. São Paulo - SP, 1991.

NBR 5733:1991. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cimento Portland com Alta Resistência Inicial. São Paulo- SP, 1991.

NBR 6120:1980. Versão Corrigida: 2000. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. São Paulo - SP, 2000.

NBR 6453:2003. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cal virgem para construção civil – Requisitos. São Paulo - SP, 2003.

NBR 7175:2003. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cal Hidratada Para Argamassas. São Paulo - SP, 2003.

NBR 7211:2009. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Agregados para concreto – Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo - SP, 2009.

NBR 11578:1997. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Cimento Portland composto - Correção 1997. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo - SP, 1997.

NBR 11941:2003. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Densidade Básica da Madeira. São Paulo -SP, 2003.

NBR 13529:2013. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. São Paulo - SP, 2013.

NBR 14833-1:2009. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Revestimento de Pisos Laminados Melamínicos de Alta Resistência. São Paulo - SP, 2009.

NBR 14432:2001. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. São Paulo- SP, novembro, 2001.

NBR 14789:2012. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Os princípios, critérios e indicadores para plantações florestais. São Paulo - SP, novembro, 2012.

NBR 15575:2013. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Edificações Habitacionais — Desempenho. São Paulo - SP, 2013.

NBR ISO 14025:2015. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. São Paulo - SP, 2015.

NBR ISO 14040:2009 Versão Corrigida: 2014. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. São Paulo- SP, 2009.

NBR ISO 14044:2009. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Gestão Ambiental Avaliação do ciclo de vida Requisitos e orientações. São Paulo - SP, 2009.

NBR ISO 14064-1:2007. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Parte 1: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa, São Paulo - SP, novembro, 2007.

NEMRY, F.; UIHLEIN, A.; COLODEL, C. M.; WITTSTOCK, B.; BRAUNE, A.; WETZEL, C.; HASAN, I.; NIEMEIER, S.; FRECH, Y.; KREIBIG, J.; GALLON, N. Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building) EUR 23493 EN - 2008. **JRC - Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, European Commission**, Luxembourg, 2008. 395 p.

NOAA **National Oceanic and Atmospheric Administration.** Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, U.S. Department of Commerce, 2015.

OLIVEIRA, E. O.; NAKAJIMA, N. Y.; CHANG, M.; HALISKI, M.; Determinação da quantidade de madeira carbono e renda da plantação florestal. **Embrapa Florestas**, Colombo - PR, 2011. 39 p.

OLIVEIRA, E. W. N. Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia, **Universidade do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro - RJ, 2009. 87 p.

PARCHEN, C. F. A., IWAKIRI, S., ZELLER, F., PRATA, J. G. Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites. **European Journal of Wood and Wood Products**. Volume 74, Issue 1, p 75–81 January 2016.

PE INTERNATIONAL. Life Cycle Assessment of Rough-sawn Kiln-dried Hardwood Lumber. **PE International AG.**, Leinfelden-Echterdingen, Germany, July 2012. 89 p.

PE INTERNATIONAL. Reinforcing Steel - Dier Demir Çelik. **PE international AG.** Leinfelden-Echterdingen, Germany, November 2013. 7 p.

PIANCA, J. B. Manual do Construtor. **Editora Globo**, São Paulo – SP, 1978.

PIEKARSKI, C. M. Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, **Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa**, Ponta Grossa - PR, 2013. 148 p.

PINGUELLI ROSA, L. Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro. **Fundação COPPETEC**, Rio de Janeiro- RJ, 2011. 151 p.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A. e TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 161-170, Maringá - Pr, 2011. 10 p.

POUEY, M. T. F. Estudo experimental do desempenho térmico de coberturas planas - vegetação e terraço. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre - RS. 1998. 166 p.

PUETTMANN, M.; ONEIL E.; WILSON, J.; JOHNSON, L. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Softwood Plywood Production from the Pacific Northwest.

CORRIM - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, Research Reports. Updated April 2013a. 34 p.

PUETTMANN, M.; ONEIL E.; KLINE, E.; JOHNSON, L. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Oriented Strandboard Production from the Southeast.

CORRIM - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, Research Reports. Updated April 2013b. 35 p.

PUETTMANN, M.; ONEIL, E.; WILSON, J. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of U.S. Medium Density Fiberboard Production. **CORRIM - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials**, Research Reports. August, 2013c. 43 p.

PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M.; GONZÁLEZ-BARROSO, J. M. Simplified LCA of Brazilian lumber: PLANTED vs. lumber non-managed native lumber. **Holcim Foundation for Sustainable Construction**, University of São Paulo., São Paulo - SP, 2012. 1 p.

QUANTIS. Análise comparativa do Ciclo de Vida de Paredes Construídas com blocos cerâmicos, blocos de concreto e concreto armado moldado in loco. **Quantis Sustainability Counts**. Montreal, Canada, 2012. 125 p.

QUANTIS. EPD – Environmental Product Declaration - S-P-00895 - CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI (bulk form) by Votorantim Cimentos. **Quantis Sustainability Counts**. Lausanne, Switzerland, 2016. 15 p.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira** nº 89, p 100-106, abril, 2005.

RAO, A. B.; RUBIM, E. S. A technical, economic, and environmental assessment of Amine-based, CO₂, capture technology for Power plant greenhouse gas control. **Environmental Science & Technology**, V. 36, nº 20, p. 4467-4475, Washington, DC, U.S.A, 2002.

RAMACHANDRAN, V.S. Concrete Admixtures Handbook, 2nd Ed.: Properties. Science and Technology. **Noyes Publications**, Park Ridge - NJ, U.S.A., December 1996. 1183 p.

RAZERA, D. L. Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção de painéis aglomerados e produtos moldados de madeira. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba - PR, 2006. 157 p.

RYAN, R. 3013EPD-14-0508. Saint-Gobain Construction Products CZ, division Rigips. Central SHEAR LCA Team, **Saint-Gobain Gypsum**, Uttoxeter, Staffordshire, U.K., March, 2015. 15 p.

ROWE, D.B. Green roofs as a means of pollution abatement. **Elsevier, Environmental Pollution**, Volume 159, Issues 8–9, p 2100-2110, August–September 2011.

RS & USNAS. Climate Change - Evidence & Causes. **An overview from the Royal Society and the US National Academy of Sciences**, 2014. 36 p.

RÜTER, S.; DIEDERICH, S. Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht - aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie. Nr. 2012/1 Zentrum Holzwirtschaft, **Universität Hamburg**. Hamburg, Deutschland, april 2012. 316 p.

RUUSKA, A. Carbon footprint for building products. ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products. VTT Technology 115. **VTT Technical Research Centre of Finland**. Espoo, Finland, 2013. 126 p.

SANDBERG, H.; LAGNEBORG, R.; LINDBLAD, B.; AXELSSON, H.; BENTELL, L. CO₂ emissions of Swedish steel industry. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, p. 420–425, 2001.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Elsevier, Solar Energy** 103, p. 682–703, 2014.

SEDJO, R.; SOHNGEN, B.; MENDELSON, R. Estimating Carbon Supply Curves for Global Forests and Other Land Uses. April 2001 • Discussion Paper 01–19. **Resources for the Future**, Washington, D.C, 2001. 34 p.

SEVERO, E. M. F. Impactos ambientais: o grande desafio para o crescimento sustentável da indústria do gesso pernambucano. Dissertação de Mestrado do

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, **Universidade de Pernambuco**, Recife - PE, 2011. 127 p.

SILVA, D. A. L. Avaliação do Ciclo de Vida da Produção do Pannel de Madeira MDP no Brasil. Tese de Doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, **Universidade de São Paulo**, São Carlos - SP, 2012. 207 p.

SILVA, J. O. Perfil da Cal. Brasília: **Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**, 2009. 39 p.

SILVA, N. G. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária. Dissertação de Mestrado em Engenharia. **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba - PR, 2006. 180 p.

SINAT. Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”) Diretriz SINAT Nº 005 Revisão 02, **Ministério das Cidades**, Secretaria Nacional de Habitação – SNH, PBQP-H, Brasília - DF, março, 2017. 73 p.

SINDUSCON-SP. Guia metodológico para inventários de emissões de gases de efeito estufa na construção civil – setor edificações. **SINDUSCON**, São Paulo - SP, 2013. 76 p.

SJUNNESSON, J. Life Cycle Assessment of Concrete. Master thesis, Lund University, **Department of Technology and Society - Environmental and Energy Systems Studies**, Sweden, September, 2005. 61 p.

SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida, UFSC, **Ambiente Construído**. Florianópolis - SC, 2004. 12 p.

STACHERA, T. J.; CASAGRANDE, E. F. J. Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008. 13 p.

TAM, L. Environmental Product Declaration – North American Softwood Plywood. **FPI Inovation**, Pointe Claire, Canada, 2013. 15 p.

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change. Framework Convention on Climate Change - FCCC/CP/2015/L.9. 12 **United Nations**, December 2015.

USEPA. **United States Environmental Protection Agency**, Wood waste combustion in boilers. Washington, 2003. 20 p.

VILLAS BÔAS, B. T. Utilização de Cimento Portland e Resíduos de *Pinus* spp. para Fabricação de Blocos Vazados de Baixa Densidade. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba – PR, 2016. 192 p.

WARK, C. G.; WARK, W. W. Green Roof Specifications and Standards, Establishing an emerging technology. **The Construction Specifier**, Vol. 56, No.8, August 2003.

WBCSD. **World Business Council for Sustainable Development**. CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Cement Sustainability Initiative (CSI), Geneva, Switzerland, 2005. 62 p.

WBCSD. **World Business Council for Sustainable Development**. CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Cement Sustainability Initiative (CSI), Geneva, Switzerland, 2011. 80 p.

WINJUM, J.K.; BROWN, S.; SCHLAMADINGER, B. Forest harvests and wood products: sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. **Forest Science** 44: p. 272-284. Bethesda - MD, U.S.A., 1998.

WHITTINGHILL, L. J.; D. ROWE, D. B.; SCHUTZKI, R.; CREGG, B. M. Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. Elsevier, **Landscape and Urban Planning**, Volume 123, p. 41–48, March, 2014.

WOODSOLUTIONS. Environmental Product Declaration – Particleboard EPD No. S-P-00562. Forest and Wood Products Australia Ltd. **WoodSolutions** 2015. 32 p.

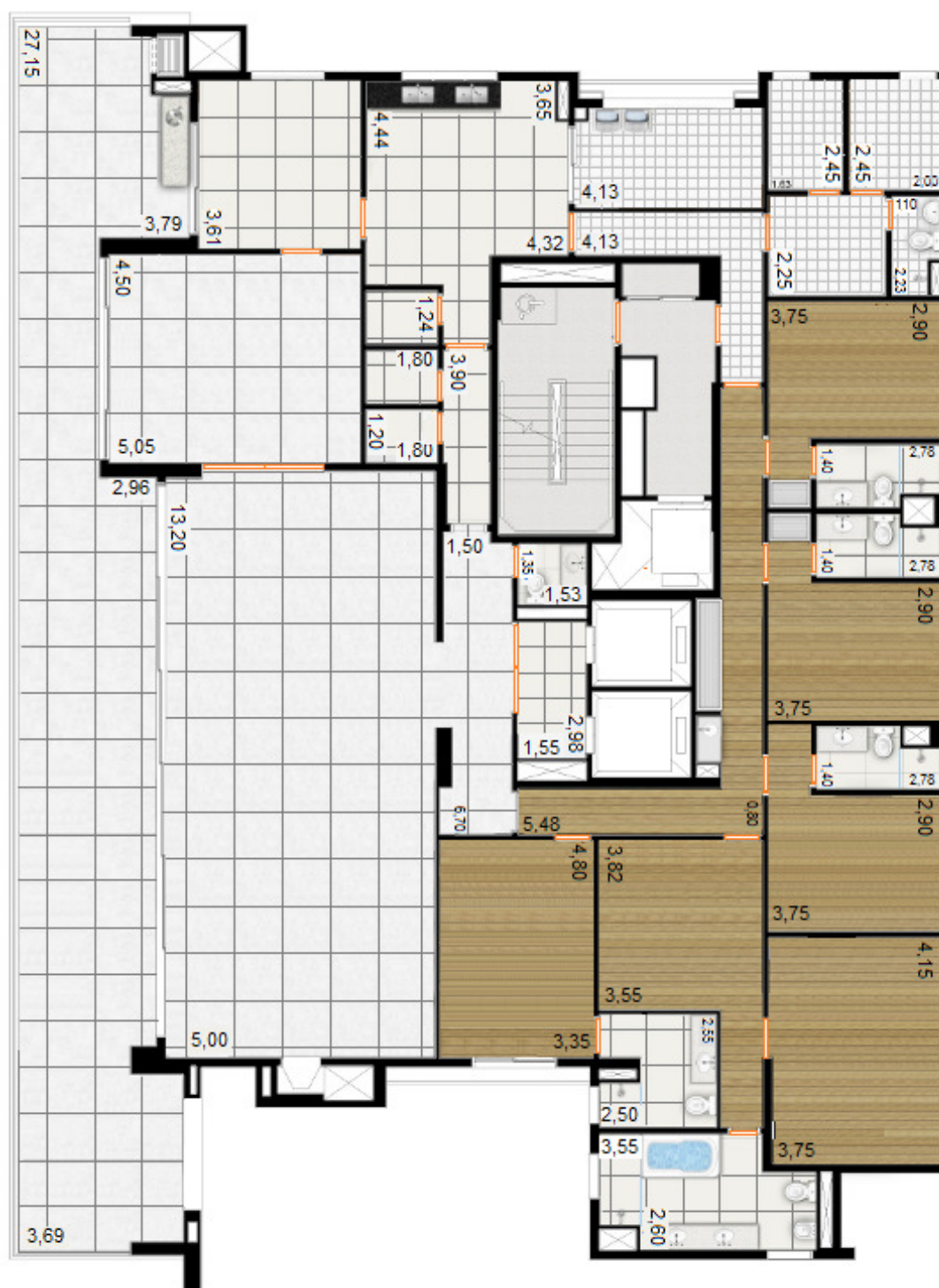
WRI. **World Resources Institute**. A Corporate Accounting and Reporting Standard - Revised edition. The Greenhouse Gas Protocol, 2004. 116 p.

WSA. **World Steel Association.** Methodology report - Life cycle inventory study for steel products. Brussels, Belgium, 2011. 95 p.

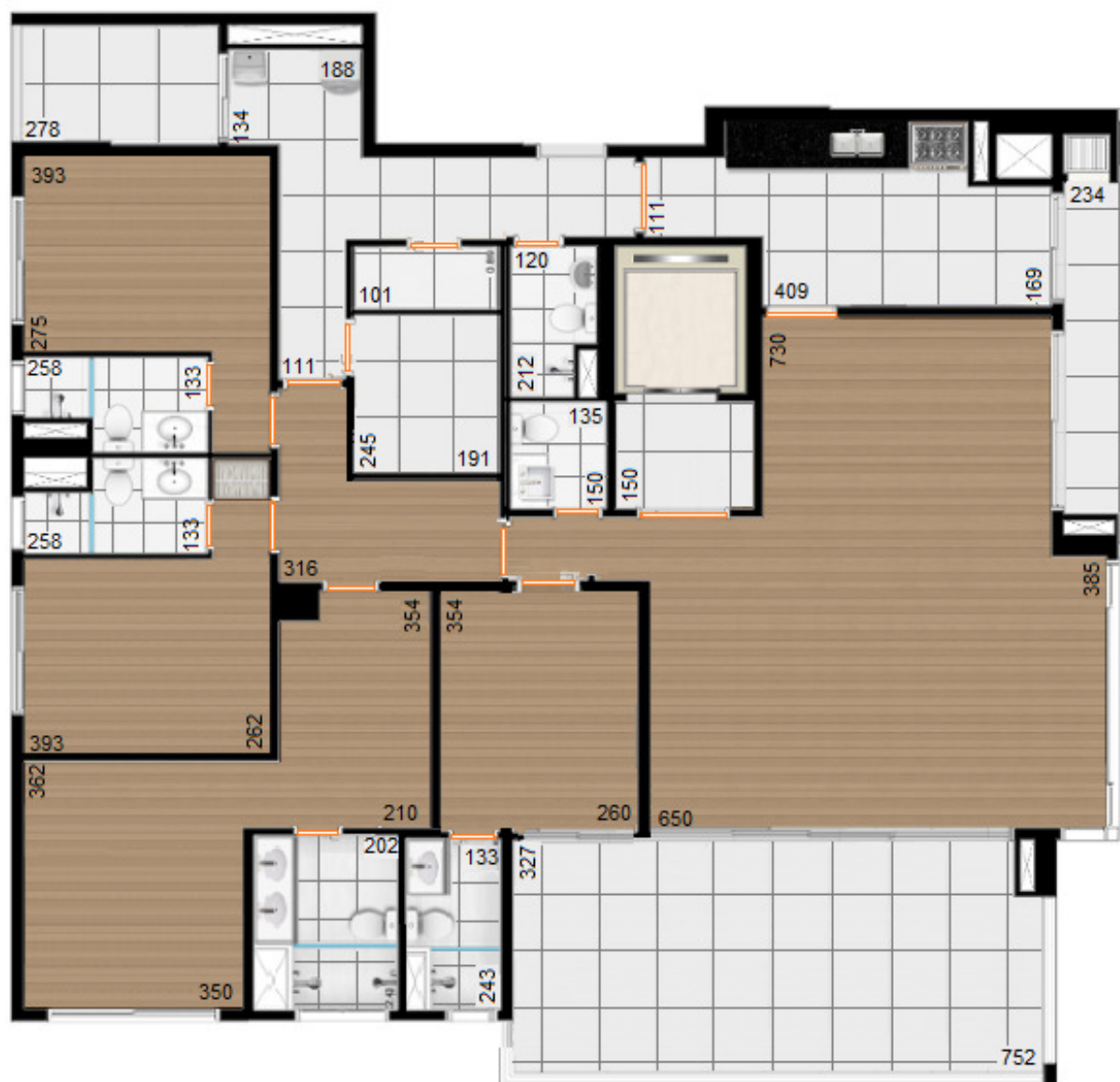
APÊNDICE 1 – PLANTAS DOS APARTAMENTOS SELECIONADOS

Neste apêndice estão apresentadas nas Figuras A1 até A5, nas plantas dos apartamentos de referência. Essas plantas são adaptações de material publicitário de uma grande construtora, de edifícios localizados em São Paulo.

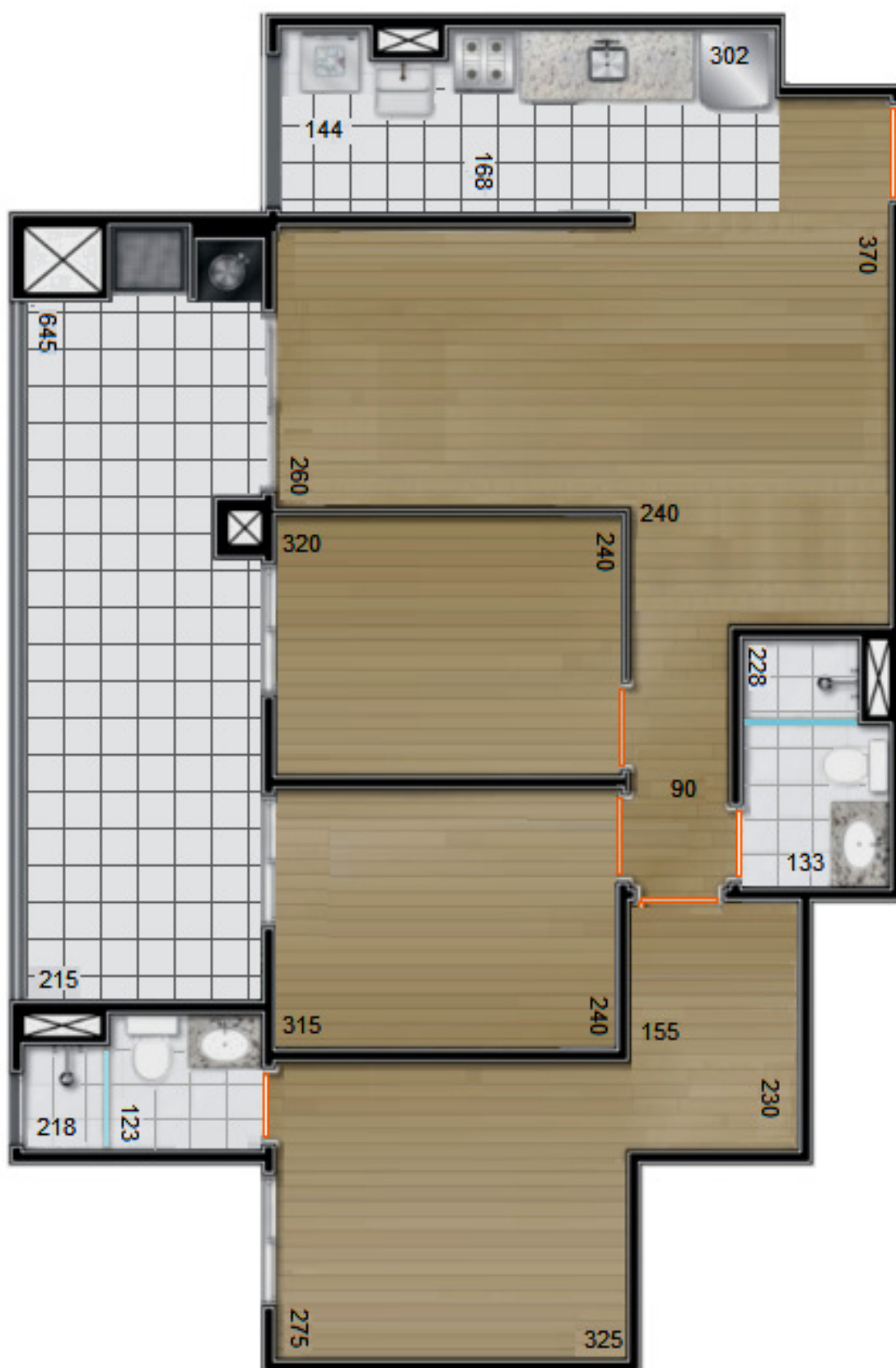
FIGURA A1 - PLANTA DO APARTAMENTO “A” DE 476,3 m² PRIVATIVOS



FONTE: Adaptação do disponível em: <<https://www.even.com.br/>>, acesso em 10 dez. 2015.

FIGURA A2 - PLANTA DO APARTAMENTO “B” DE 222,7 m² PRIVATIVOS

FONTE: Adaptação do disponível em: <<https://www.even.com.br/>>, acesso em 10 dez. 2015.

FIGURA A4 - PLANTA DO APARTAMENTO "D" DE 89,0 m² PRIVATIVOS

FONTE: Adaptação do disponível em: <<https://www.even.com.br/>>, acesso em 10 dez 2015.

FIGURA A5 - PLANTA DO APARTAMENTO “E” DE 61,5 m² PRIVATIVOS

FONTE: Adaptação do disponível em: <<https://www.even.com.br/>>, acesso em 10 dez 2015.

ANEXO 1 – Artigo:

FREITAS J. A.; SANQUETTA C. R.; IWAKIRI S.; COSTA M. R. M. M.; KOEHLER H. S. Estudo da aplicação de coberturas verdes no objetivo de se construir edifícios neutros em carbono. **Holos Environment** 2017, 17 (1): p 35-52.



ESTUDO DA APLICAÇÃO DE COBERTURAS VERDES NO OBJETIVO DE SE CONSTRUIR EDIFÍCIOS NEUTROS EM CARBONO

STUDY OF GREEN ROOFS APPLICATIONS IN ORDER TO DELIVER BUILDINGS NEUTRAL CARBON

José de Almendra Freitas Jr.¹, Carlos Roberto Sanquetta¹, Setsuo Iwakiri¹, Marianne Do Rocio de Mello Maron da Costa¹, Henrique Soares Koehler¹

Artigo recebido em: 13/06/2016 e aceito para publicação em: 22/03/2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v17i1.11494>

Resumo: No contexto das mudanças climáticas o setor da construção civil vem se envolvendo em programas de mitigação e neutralização de emissões de gases do efeito estufa (GEE). Uma das formas possíveis de “neutralizar” parte das emissões é transformar as edificações em reservatórios de carbono por meio da implantação de “coberturas verdes”, que consiste no cultivo de vegetação em substratos de terra na cobertura dos edifícios. Ocorre que esta implantação acrescenta carga à estrutura da edificação, havendo a necessidade desta ser reforçada. Este trabalho, por meio de um estudo de caso representativo, ajuda a analisar se o acréscimo de emissões de CO₂ decorrente do reforço estrutural é menor que o carbono armazenado na “cobertura verde”, verificando a viabilidade desta técnica neste aspecto. O trabalho demonstrou que para o estudo de caso, esta implantação tem saldo muito positivo quanto às emissões de CO₂, armazenando muito mais carbono que emitindo, podendo neutralizar de forma significativa as emissões decorrentes da construção da obra.

Palavras-chave: Cobertura verde. Emissão de CO₂. Construção.

Abstract: *In the context of climate change, the industrial sectors have been involved in mitigation and neutralization programs of emissions of greenhouse gases (GHGs). One way with the construction industry has to "neutralize" some of their emissions is to transform the building in carbon sinks through the implementation of "green roofs," which consists of the vegetation growing on land substrates on the roof of buildings. It happens that this deployment adds load to the building structure, with the need for this to be strengthened. This work, through a study of representative case, helps to examine whether the addition of CO₂ emission resulting from the structural reinforcement is less than the carbon stored in the "green roofs", verifying the feasibility of the this technique in this regard. The study showed that for the case study, this deployment has very positive balance as CO₂ emissions by storing more carbon than emitting and can significantly neutralize the emissions from the construction work.*

Keywords: *Green roof. CO₂ emissions. Construction.*

¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR). Emails: (freitasjose@terra.com.br, carlos_sanquetta@hotmail.com, setsuo.ufpr@gmail.com, marianne@ufpr.br, koehler@ufpr.br)

1 INTRODUÇÃO

Devido aos crescentes desafios ambientais que a sociedade atual vem enfrentando, o problema do efeito estufa e o aumento das concentrações do CO₂ na atmosfera vem se tornando cada vez mais relevante e preocupando as principais nações do mundo. Dentro deste contexto muitos países desenvolvidos (ou cidades de forma individual) tem implementado regulamentos especificamente destinados a controlar as emissões de carbono pelos edifícios, tanto na fase de uso como para a fase de construção. O desafio atual para a indústria da construção civil destas nações é alcançar o objetivo de produzir edifícios “neutros em carbono” a partir de 2020, o que significa alcançar o equilíbrio entre as quantidades de carbono emitidas e seqüestradas ou armazenadas. A definição "neutralização de carbono" é usada internacionalmente no sentido da redução e/ou compensação do carbono emitido por uma atividade. O Brasil, embora ainda não tenha atingido este nível de ações, já têm construtoras e incorporadoras que vem se preocupando com este problema e voluntariamente tomando ações e buscando caminhos para minimizar as suas emissões.

Em 2009 a ONU, por meio da UNEP (*United Nations Environment Programme*) colocou para discussões na 15ª Conferência das Partes (COP 15), como assunto relevante, que as construções são fonte de importantes emissões e que é o setor industrial que tem o maior potencial para alcançar reduções significativas e de baixo custo de emissões de GEE. A UNEP salientava que os países não conseguirão cumprir as metas de redução de emissões sem aumentos de eficiência energética na construção e que este setor industrial já está empenhado em muitos países em desempenhar um papel de liderança nas reduções de emissões (UNEP, 2009). Os levantamentos de emissões dos GEE relativos à produção das edificações, como para qualquer produto industrial, devem seguir as normas NBR ISO 14025:2015, NBR ISO 14064:2007, NBR ISO 14040:2009 versão corrigida 2014 e NBR ISO 14044:2009 Errata 1:2014. Estas normas recomendam também que se relate o carbono armazenado, quando este é de origem biogênica, não fóssil.

O uso de materiais de construção de madeira assim como a fixação de carbono de origem não fóssil dentro de uma edificação tem grande potencial para contrabalançar ou neutralizar as inevitáveis emissões decorrentes do processo

construtivo. Isto se deve ao fato que de 40 a 45% da massa da madeira é composta pelo elemento químico carbono (C) e como este representa apenas uma fração da molécula de CO₂, portanto cada unidade de massa de carbono fixada representa a não emissão de 3,667 unidades de massa de CO₂ (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Este trabalho mostra, por meio de um estudo de caso, que três abordagens diferentes de “coberturas verdes” podem compensar boa parte das emissões de GEE que ocorrem durante a fase de construção de um edifício, e prova também, que o reforço da estrutura do edifício necessário para suporta-las causa bem menos emissões que neutraliza. Estas coberturas, além de capturarem e armazenarem carbono em sua vegetação, como é obviamente intuitivo, servem também como reservatório de carbono no seu solo de substrato, contrabalançando parte dos efeitos da remoção do solo original do terreno da obra.

Rowe (2010) define uma “cobertura verde” como o cultivo de vegetação em solo vegetal em cima de um edifício, salientando que estas proporcionam benefícios ambientais e reduzem as nas emissões de CO₂ pelas construções, capturando e fixando o carbono na vegetação e armazenando carbono no substrato, além de melhorar o desempenho térmico das edificações. Santamouris (2014) coloca que as “coberturas verdes” minimizam os efeitos das mudanças climáticas nas cidades, reduzindo aumentos de temperatura decorrentes da formação de ilhas de calor. Li e Yeung (2014) reportam que estas melhoram o desempenho dos equipamentos de ar condicionado, minimizando também os picos de descarga de águas pluviais. Garrison e Horowitz (2012) colocam que as “coberturas verdes” podem desempenhar um pequeno papel na redução CO₂ na atmosfera, devido ao carbono que é armazenado no solo ou substrato, assim como do carbono sequestrado pela vegetação.

Devido ao fato de que a implantação de uma “cobertura verde” acrescenta carga na estrutura da edificação, esta precisa ser reforçada para se suportar este peso extra. Este estudo de caso analisa especificamente os acréscimos de CO₂ decorrentes deste reforço, comparando-se com o carbono armazenado na “cobertura verde”.

No Brasil ainda não é usual a adoção de “coberturas verdes” nos edifícios, devido a características culturais, de custos, da necessidade de manutenção entre outras, mas que devido a crescente necessidade de mitigar as

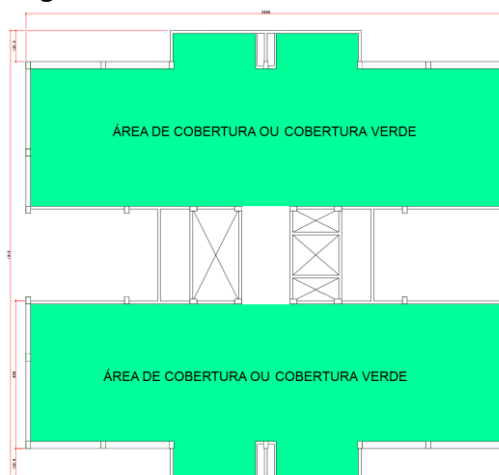
emissões dos GEE seria interessante mudar esta prática. Salienta-se que há uma grande carência de estudos que proporcionem um melhor dimensionamento dos benefícios das “coberturas verdes” quanto a mitigação e neutralização das emissões de GEE.

Este trabalho visa demonstrar que a implantação de uma “cobertura verde” sobre um edifício residencial pode neutralizar de forma significativa as emissões de CO₂ decorrentes da construção da obra.

2 MATERIAL E MÉTODOS

São muitas as formas arquitetônicas com as quais se pode colocar uma “cobertura verde” em um edifício. Para se alcançar o objetivo deste trabalho, optou-se por analisar um estudo de caso representativo. Para tanto foi selecionado um projeto de um edifício residencial tradicional, com quatro pavimentos com estrutura em concreto armado. O projeto do edifício contempla a possibilidade de se instalar dois terraços na cobertura nos quais são passíveis se instalar “coberturas verdes” que totalizam uma área de 352,38 m². O esquema da planta de cobertura está mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Planta da cobertura do edifício



Dentro do estudo de caso, foi projetada a estrutura para o edifício de quatro formas, uma com cobertura de laje impermeabilizada e três com variações de “coberturas verdes”, de diferentes substratos e vegetações, para todos, simulando análises de ciclo de vida (ACV), foram levantadas as quantidades de emissões de CO₂.

Para as três alternativas de “coberturas verdes”, este estudo determinou a quantidade de carbono armazenado nos solos utilizados como substratos para este e na vegetação.

Com os totais de carbono armazenado e as emissões de CO₂ da implantação das variações da estrutura, procederam-se balanços e análises comparativas.

2.1 Definições das alternativas de “coberturas verdes”

Analisaram-se três tipos diferentes de “coberturas verdes” dentro da classificação citada em Wark e Wark (2003), que são: extensivas, semi-intensivas e intensivas, cujas especificações básicas são:

- Extensiva, tipo mais simples, apropriada para ervas e gramíneas, exige uma espessura de solo do sistema de 6 a 20 cm, necessitando de uma baixa manutenção e não tem irrigação;
- Semi-intensiva, apropriado para gramíneas e arbustos, exige uma espessura de solo do sistema de 12 a 25 cm, necessitando de manutenção periódica;
- Intensiva, suporta arbustos e árvores exigindo uma espessura de solo do sistema de 15 a 40 cm, exigindo uma manutenção alta, com irrigação regular.

As variações da estrutura do edifício foram dimensionadas para cada alternativa de forma a suportar a carga decorrente do somatório dos pesos da impermeabilização, drenagem, do substrato de solo, da vegetação e da manutenção. Cada uma gera um carregamento que corresponde com o tipo e uso da “cobertura verde” desejada. Para se projetar a estrutura de um edifício, foram consideradas as cargas permanentes e as cargas acidentais, conforme a NBR 6120:1980.

As cargas permanentes incluem o peso-próprio da estrutura, acrescidas do peso do conjunto de materiais que compõe as camadas do sistema da “cobertura verde” sobre uma laje. As camadas são: o sistema de impermeabilização com sua proteção, a drenagem, o substrato ou a camada de terra ou solo dão suporte à vegetação e a cobertura vegetal propriamente dita. Às cargas permanentes deve ser acrescido ainda o peso da água retida.

A NBR 6120:1980 considera para dimensionamento estrutural de edifícios, a carga para terra compactada, de 1.800 kgf/m^3 . Para o caso de uma “cobertura verde”, pode-se considerar 1.550 kgf/m^3 , que seria a carga para terra vegetal úmida com 15% de umidade. Para se estimar as cargas permanentes dos três tipos de “coberturas verdes” foi considerada a carga de 1.550 kgf/m^3 para o substrato de solo e estimando a espessura média do sistema de impermeabilização em 12 cm e uma carga permanente para esta camada em 250 kgf/m^2 . Cabe ressaltar que esta carga é a mesma que seria utilizada para representar uma cobertura em telhas de fibrocimento comum sobre uma laje de concreto armado.

Baseando-se nas colocações de Johnson e Newton (1991), e nos tipos de coberturas, este estudo utilizou as espessuras dos substratos em 15 cm para o extensivo, 25 cm para o semi-intensivo e 40 cm para o intensivo. Cabe salientar, que substratos de maior espessura, não somente suportam uma vegetação de maior porte, como também tem melhor desempenho como isolante térmico e acústico (CASTLETON *et al.*, 2010).

O valor da carga acidental, como está definido na NBR 6.120:1980 se refere ao carregamento decorrente da circulação de pessoas e equipamentos que farão ao uso da cobertura, que recomenda considerar a carga acidental de 300 kgf/m^2 para áreas públicas com acesso livre de pessoas, em áreas com acesso somente para manutenção, recomenda a carga de 50 kgf/m^2 .

Com o intuito de se proceder ao comparativo de impacto dos acréscimos carbono foram calculadas as emissões de CO_2 decorrentes da construção das quatro alternativas da estrutura do edifício, que foram identificados por CL para cobertura somente com laje impermeabilizada, CV1 com “cobertura verde” extensiva (15 cm de espessura), CV2 com semi-intensiva (25 cm de espessura) e CV3 com intensiva (40 cm de espessura). Em todas as alternativas de carga o estudo considerou a cobertura sem acesso aberto ao público, somente para pessoal de manutenção.

Para se desenvolver o comparativo do impacto de carbono, se dimensionou a estrutura do último pavimento do edifício para os quatro carregamentos, obtendo-se os consumos de concreto, aço e formas, para cada um. Com estes quantitativos, partindo dos fatores de emissão de CO_2 (FE) destes materiais e do seu transporte se calculou as emissões totais para cada situação, considerando a área de $352,38 \text{ m}^2$.

Para os cálculos das quantidades de carbono armazenadas por cada tipo de “cobertura verde”, se procederam as determinações das emissões e do carbono armazenado nos substratos e na vegetação. Para o carbono dos substratos, foi feita a determinação do seu teor em cinco amostras de solos de terra orgânica usadas neste tipo de jardim. O cálculo do carbono armazenado pelo substrato é obtido por meio da multiplicação da quantidade de terra orgânica pela média do teor de carbono determinado em amostras. Para o de carbono presente nas vegetações, se utilizou estimativas unitárias por área citadas em revisões bibliográficas, multiplicadas pela área da “cobertura verde”, considerando o jardim com dois anos de idade.

Multiplicando-se as quantidades de carbono por 3,667 se obteve o CO₂ que foi neutralizado, procedendo-se então às comparações e verificações de viabilidade do uso das “coberturas verdes” como agentes minimizadores de emissões de CO₂ para a obra estudo do caso.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram dimensionadas as estruturas de concreto armado para suportar as quatro alternativas diferentes de “coberturas verdes”, na sequência foi calculado o total de CO₂ emitido por cada uma delas, sendo então calculado o carbono armazenado em cada uma.

3.1 Resultados do dimensionamento estrutural

Cabe salientar que como este trabalho tem a finalidade de se fazer uma análise comparativa entre as alternativas com e sem a cobertura verde, não foi desenvolvido o projeto inteiro da estrutura do edifício, mas somente as partes da estrutura afetadas pelas cargas decorrentes da “cobertura verde”. Foram estudadas a laje de cobertura e os pilares até o térreo do edifício. Portanto partes da estrutura como os demais pavimentos tipo, caixa d’água, entre outras, não foram estudadas.

Os projetos estruturais das quatro diferentes coberturas utilizaram para dimensionamento as cargas de 250kg/m² para a impermeabilização, 50 kg/m² para carga accidental e para as alternativas de coberturas verdes CV1, CV2 e CV3, devido as diferentes alturas, as cargas de 232,5 kg/m²; 387,5 kg/m² e 620,0 kg/m²

respectivamente. Além destas cargas também foi considerado o peso próprio das diferentes estruturas.

As análises estruturais seguiram a NBR 6.118:2014, a resistência do concreto foi escolhida com o f_{ck} de 25 MPa, abrangendo as quatro alternativas de carregamento, obtendo-se o dimensionando do pavimento de cobertura para estas. Os pilares de todo o edifício foram calculados para as quatro alternativas, mas as seções de concreto e das armaduras, que foram dimensionadas para o caso menos carregado (isto é sem “cobertura verde”), não necessitaram ser aumentadas para as demais situações. As áreas mínimas de armaduras e de concreto, definidas em por Norma, dos pilares já tinham capacidade de carga para todas as hipóteses. Atendendo a estas considerações, utilizando o software para cálculo estrutural de concreto armado TQS versão 18, chegou-se aos quantitativos de aço, concreto e áreas de formas de madeira.

3.2 Resultados das emissões de CO₂ pela construção das estruturas

O cálculo das emissões geradas pelas diferentes alternativas de estruturas foi desenvolvido, procurando se aproximar da metodologia de uma ACV do “berço ao portão” com finalidade comparativa. As emissões foram calculadas a partir dos quantitativos de materiais e utilizando os Fatores de Emissão (FE) para a produção e decomposição da madeira usada nas formas, para a produção do aço e do concreto. Da mesma forma se procedeu para simular o transporte destes materiais até a obra e dentro desta.

Os FE utilizados foram retirados de bibliografias disponíveis, principalmente ACV, Declarações de Impacto ambiental de produtos (EDP ou *Environmental Product Declaration*), que são documentos auditados. Outra fonte são levantamentos de emissões divulgados em estudos científicos. Preferencialmente foram utilizadas publicações brasileiras, mas na indisponibilidade destas utilizou-se material internacional.

Para o FE do aço considerou-se uma média de valores publicados. A EDP para barras de reforço para concreto armado, desenvolvida para os EUA, calculou FE de 0,850 tCO₂eq/t de aço, (CMC, 2015). Outra EPD de uma siderúrgica da Turquia, que usa forno a arco elétrico, calculou FE de 0,802 tCO₂eq/t de aço, (PE

INTERNATIONAL, 2013). A incorporadora Even em seu relatório de emissões de 2014 utilizou o FE para barras de aço de 0,619 tCO₂eq/t, citando que esta informação veio do seu fornecedor (EVEN, 2015). Com estas informações, decidiu-se para este estudo de caso utilizar para aço de concreto armado, a média destes valores, que é o FE de 0,643 tCO₂eq/t. Os resultados calculados para as emissões pelo aço utilizado estão apresentados na Tabela 03.

Para as emissões do concreto foi considerado o FE de concreto usinado. O FE do concreto é influenciado pela sua resistência, pelo seu consumo e tipo de cimento. Outro item significativo de emissões é o transporte entre os locais de produção dos agregados e o cimento até a usina produtora de concreto. Um detalhe específico do concreto é que parte de seu processo produtivo ocorre durante o transporte de entrega da usina até a obra, que é a mistura no caminhão betoneira, situação que é considerada neste trabalho. O estudo desenvolvido por Costa (2012) estimou as emissões relativas à produção de diversos concretos. O resultado do FE para concretos com o f_{ck} de 25 MPa foi calculado usando cimento CP II-E 32 foi de 0,366 tCO₂/m³ e com CP II-F 32 de 0,3770 tCO₂/m³. Para este estudo de caso foi escolhido utilizar a média destes valores, o FE de 0,3715 tCO₂/m³ de concreto.

A madeira utilizada gera emissões durante a sua produção e depois ao final da sua vida útil. A produção da madeira emite GEE em suas fases de operações florestais e industriais, sempre considerando a exploração florestal sustentável e a madeira de origem certificada. Para as emissões da produção dos materiais de madeira, foram utilizados FE para madeira serrada e FE para painéis de madeira compensada. Uso da madeira em elementos de formas e escoramento causa emissões devido a sua degradação ao final da sua vida útil, seja por queima ou degradação aeróbia. Das duas formas o carbono contido nos tecidos vegetais combina-se com o oxigênio da atmosfera formando CO₂.

Para madeira serrada, considerando as emissões na floresta e na serraria, contabilizando as operações de derrubada das árvores, a transformação em toras, o transporte em caminhão até a serraria e, nesta última, as operações de corte, Campos (2012) em sua dissertação de mestrado para madeiras amazônicas, calculou FE para madeira serrada, sem o processo de secagem, com transporte variando de 0,0607 tCO₂/m³ a 0,2300 tCO₂/m³, com mediana de 0,1118 tCO₂/m³, valor que foi escolhido para este estudo.

Para painéis compensados, estudo utilizou como FE uma média de diversas ACV e EDP internacionais (PUETTMANN *et al.*, 2013 e ATHENA, 2012). O valor calculado para FE foi de 0,1985 tCO₂/m³ de painel compensado.

Para as formas de madeira foi considerando que estas possuem uma reutilização de 10 vezes e uma densidade média de 0,490 t/m³. Para o carbono emitido devido à decomposição utilizou-se os teores de carbono publicados em Oliveira *et al.* (2011), que relacionam medições da biomassa seca de madeira para as principais espécies da região de Curitiba, utilizando-se para os cálculos que 45% de sua massa é de carbono.

Estimou-se as emissões de transporte rodoviário do aço, concreto, escoramento e forma de seu local de produção até a obra do edifício, considerando-se uma distância de 200 km. Simulando o transporte por meio de caminhões semi-pesados, utilizando o fator de consumo de Diesel de 0,196 L/t/km de Costa (2012), e o FE de 3,3 kgCO₂/L de Diesel usado em CBCS (2014).

Para as emissões de transporte dentro da obra, da chegada até o pavimento de aplicação, considerou-se o uso de energia elétrica (motores de elevadores) para as formas, escoramento e, aço. Para o concreto considerou-se o uso de bomba a óleo Diesel. Para a energia elétrica utilizou-se o FE de 0,06 kgCO₂/kWh fornecido pelo Ministério de Ciência e Tecnologia para a média dos anos de 2011, 2012 e 2013. Tanto para o bombeamento de concreto, como para o transporte por elevador elétrico, os tempos e consumos de energia e Diesel foram levantados em obras, acompanhando-se o funcionamento destes equipamentos.

Os resultados para as emissões pelo concreto estão apresentados na Tabela 1, as emissões pelos sistemas de formas estão na Tabela 2.

Tabela 1 – Emissões pelo concreto e aço

Alternat.	Concreto (m ³)	Aço (t)	Emissões				Total (tCO ₂)
			Concreto		Aço		
			Produção (tCO ₂)	Transp. (tCO ₂)	Produção (tCO ₂ eq)	Transp. (tCO ₂)	
CL	37,1	1,580	13,783	2,153	1,016	0,204	17,156
CV1	37,3	1,848	13,856	2,164	1,188	0,239	17,449
CV2	37,3	2,017	13,856	2,164	1,297	0,260	17,579
CV3	37,8	2,303	14,043	2,193	1,481	0,298	18,015

Fonte: os autores

Tabela 2 – Emissões pelos sistemas de formas e escoramento

Alternat.	Madeira serrada (m ³)	Compensado 14 mm (m ³)	Produção	Emissões em (tCO ₂)		
				Decompos.	Transp.	Total
CL	0,47	0,58	0,168	0,850	0,067	1,084
CV2	0,47	0,58	0,170	0,858	0,067	1,095
CV1	0,47	0,58	0,170	0,858	0,067	1,095
CV3	0,48	0,60	0,173	0,874	0,068	1,115

Fonte: os autores

3.3 Resultados do carbono armazenado pelas “coberturas verdes”

Para determinar as quantidades de carbono armazenadas no substrato, em primeiro lugar este estudo analisou cinco amostras de solo orgânico (terra preta) usual no Brasil, para estes tipos de jardins. A média dos teores de carbono, obtidos com o emprego de um analisador LECO C-144, foi de 30,24%.

A média das densidades das amostras dos mesmos solos, medidas através do método do anel volumétrico (WHITTINGHILL, 2014) foi de 1,01 g/cm³. Este valor é conservador, tendo em vista que com o tempo e o aumento da profundidade a densidade do solo tende a aumentar.

Para calcular a massa de solo utilizado por m² em cada alternativa de cobertura, consideraram-se as espessuras de 15 cm para a CV1, 25 cm para a CV2 e 40 cm para a CV3, para os quais ainda foi prevista uma camada de drenagem de pedrisco de seixos com 5 cm de espessura. Portanto os substratos em terra orgânica ficaram em 10, 20 e 35 cm respectivamente.

Getter *et al.* (2009) em seu trabalho para “coberturas verdes” extensivas, quantificaram o carbono armazenado acima do solo com média de 0,275 kg.C/m². Lal e Augustin (2012), em seu livro citam que jardins urbanos, com cuidado intensivo, somente acima do solo seqüestram de 0,30 a 0,40 kg de carbono por m² por ano.

As massas de carbono fixadas diretamente na estrutura celular da vegetação são relativamente pequenas, devido ao porte da vegetação e que apenas uma fração da sua massa ser de carbono, a maior parte da massa é composta de água.

Este trabalho considerou, para as diferentes “coberturas verdes”, os valores de massa de carbono armazenada por meio do sequestro e armazenamento de CO₂ do ar pelo crescimento da vegetação em dois anos, de 0,275 kg.C/m² para o CV1, de 0,600 kg.C/m² para o CV2 e 0,800 kg.C/m² para o CV3. Os totais de massa de carbono armazenados, e os correspondentes CO₂ não emitidos, pela vegetação o solo orgânico

do solo nas três alternativas, estão apresentados na Tabela 3. O carbono dos sistemas de raízes está contabilizado nos substratos, portanto os valores da vegetação referem-se somente a parte aérea desta.

Tabela 3 – Armazenamento de carbono pelo solo orgânico e a vegetação

Alt.	Solo Orgânico			Vegetação		Total armazenado	
	Altura (cm)	Massa (t)	Carbono (t)	Carbono por área (kg.C/m ²)	Carbono (t)	Carbono (t)	CO ₂ (t)
CV1	10	35,590	10,764	0,275	0,097	10,861	39,827
CV2	20	71,181	21,528	0,600	0,211	21,740	79,719
CV3	35	124,566	37,674	0,800	0,282	37,956	139,186

Fonte: os autores

Estimou-se as emissões da obtenção do substrato, composto pelo solo e pedrisco de seixo (densidade de 1,4 t/m³), baseando-se nos FE utilizados na ACV CBCS (2014), o FE para o pedrisco de seixo é 1,14 kgCO₂/m³ e o FE para extração de solo orgânico 0,909 kgCO₂/m³. Salienta-se que estes materiais praticamente não sofrem processos de industrialização, é quase somente a energia de extração por máquinas a Diesel. Os volumes de solo foram de 35,24; 70,48 e 123,33 m³ para as alternativas CV1, CV2 e CV3 respectivamente e o volume de pedrisco de seixo de 17,62 m³ igual para as três alternativas. As emissões calculadas para a obtenção do substrato de solo orgânico e pedrisco de seixos foram calculadas em 0,052; 0,084 e 0,132 tCO₂ para as alternativas CV1, CV2 e CV3 respectivamente.

Estimaram-se as emissões de transporte do solo e do material drenante do seu local de extração até a obra, considerando-se a distância de 25 km. Utilizando o mesmo método e critério aplicado aos materiais da estrutura, transporte rodoviário por caminhões semi-pesados e transporte vertical dentro da obra com elevador elétrico. As emissões calculadas para o transporte do substrato de solo orgânico e pedrisco de seixos foram calculadas em 0,976; 1,553 e 2,418 tCO₂ para o total destes materiais usados nas alternativas CV1, CV2 e CV3 respectivamente.

Para todo o material do substrato, somando-se o carbono armazenado e subtraindo as emissões de obtenção e transporte, calcularam-se os valores da Tabela 4, onde estão apresentados os totais de CO₂ equivalentes ao carbono armazenado e os totais por m² de área de cobertura verde.

Tabela 4 – Saldo do armazenamento de carbono das alternativas de coberturas

Alternativas	Emissões (tCO ₂)	Armazenamento (tCO ₂)	Saldo (tCO ₂)	Saldo (tCO ₂ /m ²)
CV1	1,028	39,827	38,799	0,110
CV2	1,637	79,719	78,082	0,222
CV3	2,550	139,186	136,636	0,388

Fonte: os autores

3.4 Balanços das emissões e do armazenamento de carbono

A Tabela 5 apresenta os totais de CO₂ emitidos e armazenados. Nesta tabela já é possível verificar os acréscimos de emissões necessários para as alternativas estudadas. Observa-se que são positivos os saldos das emissões devido ao aumento da capacidade da estrutura quando se considera o carbono armazenado nas alternativas de coberturas verdes.

Tabela 5 – Carbono armazenado e acréscimos de emissões

Alternativas	Emissões		Armazenamento (tCO ₂)	Saldo	
	Por alternativa (tCO ₂)	Acréscimos (tCO ₂)		(tCO ₂)	(tCO ₂ /m ²)
CL	18,240	-	-	-	-
CV1	18,543	0,304	38,799	38,496	0,109
CV2	18,674	0,434	78,082	77,648	0,220
CV3	19,130	0,890	136,636	135,745	0,385

Fonte: os autores

3.5 Discussão

Analisando as “coberturas verdes”, o primeiro ponto a se ressaltar é a sua enorme capacidade de armazenar carbono. Neste estudo de caso estas coberturas apresentaram um saldo favorável de armazenamento de carbono de 0,109 tCO₂/m² para a CV1, 0,220 tCO₂/m² para a CV2 e 0,385 tCO₂/m² para a CV3. Estes resultados condizem com os valores obtidos por Whittinghill *et al.* (2014), no qual foram medidas quantidades de carbono armazenados de até 0,239 tCO₂/m² (ou 0,0652 tC/m²). O trabalho Whittinghill *et al.* (2014) analisou “coberturas verdes” com três anos de idade com um substrato de 10,5 cm de espessura. Nos países desenvolvidos de clima frio, é comum o uso de substratos de misturas de areia, silte e argila e fertilizantes, que inicialmente contém menor quantidade de carbono armazenado, mas absorvem mais com o tempo (WHITTINGHILL *et al.*, 2014).

Os resultados provam que as quantidades de carbono armazenadas, para o estudo de caso, são muito maiores que as emissões decorrentes do reforço necessário das estruturas para que estas suportem as “coberturas verdes”. Embora obviamente estes resultados sejam específicos para o edifício estudado, o saldo muito favorável de armazenamento de carbono, quase com certeza apresenta as coberturas verdes como uma forma significativa de aproximar a construção dos edifícios da meta de serem “neutras em carbono”.

Mesmo com um eventual uso de FE maiores para o cimento e o aço (tipos de cimento com FE maiores e siderúrgicas com maiores emissões), a superioridade dos valores de armazenamento de carbono deve permanecer.

Portanto a implantação das “coberturas verdes” é extremamente positiva no contexto da neutralização das emissões de GEE pelas obras, além de favorecer o desempenho térmico das edificações, característica que minimiza também as emissões durante a etapa de uso da edificação.

Pode-se avaliar o impacto de neutralização de emissões causado pelas “coberturas verdes”, verificando o quanto sua implantação afeta uma obra completa. Partindo das informações das obras de uma grande construtora brasileira que publica anualmente seus relatórios de emissões de GEE para seus edifícios de apartamentos, construídos em concreto armado, que apresenta uma média de emissões de 167,1 kgCO₂/m² de área construída (EVEN, 2015), observa-se que as alternativas CV1, CV2 e CV3 neutralizam respectivamente o equivalente a 65%, 132% e 230% de sua área construída. Portanto uma “cobertura verde” intensiva (CV3) pode neutralizar as emissões de construção de mais de dois pavimentos do edifício. Cabe ressaltar que nos relatórios de emissões das obras estão englobadas inclusive as emissões da remoção da vegetação original do terreno.

Como comparativo deste fator de emissão calculado para alguns edifícios Brasileiros, podemos utilizar os resultados das ACV desenvolvidas para edifícios residenciais na Espanha e na Alemanha, publicadas pelo ENSLIC *Building*, que é um projeto dentro da comissão da União Europeia. Estas ACV apresentaram fatores de emissão de 193,0 a 404,0 kgCO₂/m² (ENSLIC BUILDING, 2010a e ENSLIC BUILDING, 2010b). Esclarece-se aqui que em geral as ACV produzem FE maiores que os relatórios de emissões, salienta-se também que edifícios europeus, devido a maior

necessidade de isolamento térmico, tendem a ter fatores de emissão superiores aos brasileiros.

4 CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados pode-se concluir que:

- É muito pequeno o aumento das emissões de CO₂ necessário para que uma estrutura possa suportar o acréscimo de carga de uma “cobertura verde”;
- É grande a eficácia das “coberturas verdes” no objetivo de fixar carbono e neutralizar parte das emissões decorrentes da implantação das obras de edifícios;
- Este estudo considerou a vegetação da “cobertura verde” com a idade de dois anos, embora com o passar do tempo a quantidade de carbono presente na vegetação ainda seja crescente por um período, até a estabilização do jardim;
- Os substratos armazenam muito mais carbono que a parte aérea da vegetação, representando para as três alternativas do estudo de caso 99% do total de carbono armazenado.
- A implantação de “coberturas verdes” nas coberturas dos edifícios tem a forte tendência de alcançar saldos de carbono muito favoráveis, armazenando muito mais que às emissões decorrentes da sua implantação.

Diante do exposto, para a finalidade de neutralizar as emissões de CO₂ de uma obra de construção, a implantação de “coberturas verdes” mostrou balanços entre armazenamento e emissões, amplamente favoráveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos engs. Moacir e Fabio Inoue pelo auxílio no desenvolvimento do projeto estrutural utilizado neste trabalho, ao meu orientador Carlos Sanquetta pela ajuda conceitual geral e aos profissionais do laboratório do BIOFIX da UFPR pela execução dos ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6120**:1980 Versão Corrigida: 2000. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 30/11/1980.

ABNT. **NBR 6118**: 2014 Versão Corrigida: 2014. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 29/04/2014.

ABNT. **NBR ISO 14025**: 2015. Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos . ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 23/01/2015.

ABNT. **NBR ISO 14040**:2009 versão corrigida 2014 e Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 21/07/2014.

ABNT. **NBR ISO 14044**: 2009 Errata 1:2014. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 21/07/2014.

ABNT. **NBR ISO 14064**: 2007 Gases de efeito estufa. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 11/05/2007.

ATHENA. **A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Softwood Plywood Sheathing- an Update**. Athena Sustainable Materials Institute - Prepared for: The CertiWood™ Technical Centre, October 2012. Disponível em: <http://www.canply.org/english/news/dec2012/CDN%20Plywood%20LCA%20Final%20Report%20Oct%2028_2012.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

CBCS. **Projeto avaliação de ciclo de vida modular de blocos e pisos de concreto**. CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. Novembro de 2014. Disponível em:<http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/ACV-m/CBCS_ACV-blocos-concreto.pdf >

CAMPOS, E.F. **Emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia**: o caso da exploração convencional. Escola Politécnica, São Paulo, dissertação de mestrado, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12062013-170523/pt-br.php>> Acesso em 10 jun. 2016.

CASTLETON, H.F.; STOVIN, V.; BECK, S. B. M.; DAVIDSON, J.B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. Elsevier, **Energy and Buildings**, 42, p. 1582–1591, 2010. Disponível em: <http://www.e-futures.group.shef.ac.uk/publications/pdf/41_Green%20Roofs%20Castleton.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

CMC. **EPD - Concrete Reinforcing Steel**. Commercial Metals Company (CMC), Environmental Product Declaration of Concrete Reinforcing Steel, EPD-012, 2015.09.15. Disponível em: <http://www.astm.org/CERTIFICATION/DOCS/216.EPD_for_Concrete_Reinforcing_Steel.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil**. Rio de Janeiro, 2012, Dissertação (Mestrado) -Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE - UFRJ. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc_download/1215-bruno-luis-de-carvalho-da-costa-mestrado?Itemid=>> Acesso em 10 jun. 2016.

ENSLIC BUILDING. **D 4.2. CIRCE**. Pilot Case 3. ENSLIC - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings, 2010a. Disponível em https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/enslic_building_lca_case_studies_in_spain_en.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

ENSLIC BUILDING. **LCA of Housing Building in Frankfurt** – Case 18. ENSLIC - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings, 2010b. Disponível em: http://circe.cps.unizar.es/enslic/texto/cs_18.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

EVEN. RELATÓRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - **Inventário 2014**. EVEN Construtora e Incorporadora S/A, setembro de 2015. Disponível em: http://www.even.com.br/sustentavel/wp-content/uploads/2015/09/Even_RELATORIO-EMISSOES-2015.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

GARRISON, N.; HOROWITZ, C. **Looking Up**: How Green Roofs and Cool Roofs Can Reduce Energy Use, Address Climate Change, and Protect Water Resources in Southern California. Natural Resources Defense Council, EMMET CENTER ON CLIMATE CHANGE AND THE ENVIRONMENT, UCLA SCHOOL OF LAW. June 2012. Disponível em: <http://www.nrdc.org/water/pollution/files/greenroofsreport.pdf>> Acesso em 10 jun. 2016.

GETTER, K. L.; ROWE D. B.; ROBERTSON, G. P.; CREGG, B. M. and ANDRESEN, J. A. Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. **Environment. Science and Technology**, v. 43, n. 19, p. 7564–7570, 2009. Disponível em: <http://lter.kbs.msu.edu/docs/robertson/Getter2009EnvSciTech.pdf>> Acesso em 10 jun. 2016.

JOHNSON, J. and NEWTON, J. BUILDING GREEN. **A Guide to using on Roofs, Walls and Pavements**. Staffordshire University, The London Ecology Unit, London, 1991.

LAL, R. and AUGUSTIN, B. **Carbon Sequestration in Urban Ecosystems**. Springer, 2012.

LI, W.C.; YEUNG, K.K.A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. Elsevier, **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, June p. 127–134, 2014. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S2212609014000211/1-s2.0-S2212609014000211-main.pdf?_tid=4a8da4e4-ca6f-11e5-836a-00000aacb35d&acdnat=1454501684_28d2017a77b590685198a080930b5d61> Acesso em 10 jun. 2016.

OLIVEIRA, E. O.; NAKAJIMA, N. Y.; CHANG, M.; HALISKI, M.; **Determinação da quantidade de madeira carbono e renda da plantação florestal**. EMBRAPA FLORESTAS, Colombo PR, 2011. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/898993/1/Doc220.pdf>> Acesso em 10 jun. 2016.

PE INTERNATIONAL. **Reinforcing Steel** - DİLER DEMİR ÇELİK. PE INTERNATIONAL AG. Leinfelden-Echterdingen, Alemanha November 2013. Disponível em: http://www.dilerhld.com/upload/EPD_Report_Diler_Reinforcing_11Nov2013rev3.pdf>.

PUETTMANN, M.; ONEIL E.; WILSON, J.; JOHNSON, L. **Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Softwood Plywood Production from the Pacific Northwest**. Updated april 2013. Disponível em:

<http://www.corrim.org/pubs/reports/2013/phase1_updates/PNW%20Plywood%20LCA%20final%20May%202013.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

ROWE, D.B. **Green roofs as a means of pollution abatement**. Elsevier, Environmental Pollution, 2010. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21074914>> Acesso em 10 jun. 2016.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, 103 (2014) 682–703. Disponível em: <<http://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2015/03/Cooling-the-cities-%E2%80%93-A-review-of-reflective-and-green-roof-mitigation-technologies-to-fight-heat-island-and-improve-comfort-in-urban-environments.pdf>> Acesso em 10 jun. 2016.

UNEP. **Buildings and Climate Change** - Summary for Decision-Makers. United nations environment Programme - Sustainable Buildings & Climate Initiative. UNEP DTIE - Sustainable Consumption & Production Branch, Paris, France, 2009.

WARK, C. G. and WARK, W. W. Green Roof Specifications and Standards, Establishing an emerging technology. **The Construction Specifier**, v.56, n. 8, August 2003. Disponível em:<http://www.greenroofs.com/pdfs/newslinks-803_construction_specifier.pdf> Acesso em 10 jun. 2016.

WHITTINGHILL, L. J.; D. ROWE, D. B.; SCHUTZKI, R.; CREGG, B. M. Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. **Landscape and Urban Planning**, v.123, March 2014, Pages 41–48. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204613002296>> Acesso em 10 jun. 2016.